Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Spuren außerirdischen Lebens?

Planetologen rätseln, wie das Biogas Methan auf Mars und Titan entstand

www.spektrum.de

Reinhard Breuer
Chefredakteur

Quantenspuk und Realität

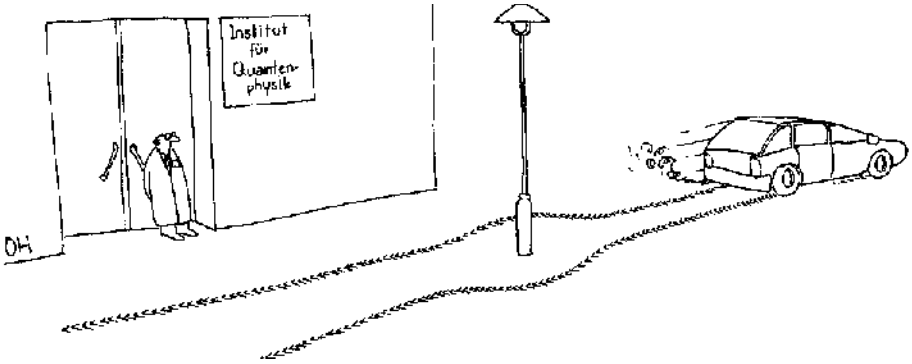
Niels Bohr sagte einmal: »Wenn es Ihnen beim Studium der Quantenmechanik nicht schwindelig wird, dann haben Sie sie nicht wirklich verstanden.« Die Welt der Quantenphysik ist bizarr und sie wird, so zeigen es laufend neue Experimente, noch bizarrer. Um solche Zeichen als Zäsur zu fassen, sprechen manche bereits von einer »zweiten Quantenrevolution«.

Aber selbst unser vermeintliches Verständnis der Quantenwelten wird in den letzten Jahren zunehmend gefährdet, etwa beim legendären Welle-Teilchen-Dualismus. Seit Mitte der 1980er Jahre experimentiert der Forscher Alain Aspect am berühmten Doppelspaltversuch mit »verzögerter Wahl«. In diesem Versuch werden wie üblich Photonen durch zwei Löcher geschickt. Doch brauchen sich die Lichtpartikel hier erst – per Messvorrichtung – für »Teilchen« oder »Welle« zu entscheiden, *nachdem* sie den Apparat durchflogen haben. Als der französische Experimentator kürzlich in einem Vortrag darüber berichtete, schien mir, als würde auch er diese Ungeheuerlichkeit fast als ein Mysterium hinnehmen, das man zwar untersuchen, aber mit dem Verstand nicht wirklich begreifen könne.

Auch die Debatte um die Realität der Mikrowelt kocht seit einigen Jahren wieder kräftig auf. Diesmal ist es hauptsächlich der Wiener Quantenphysiker Anton Zeilinger, der immer wieder Rekorde mit so genannten »verschränkten Photonenpaaren« aufstellt. Einmal erzeugt, bilden Photonenpaare ein gemeinsames Quantensystem, selbst wenn man die Photonen danach weit voneinander trennt. Wird dann eines der beiden Teilchen vermessen, fixiert dies wie durch einen telepathischen Befehl augenblicklich auch die Eigenschaft des Geschwisterteilchens.

Das ist die »spukhafte Fernwirkung«, über die 1935 erstmals Einstein, Podolsky und Rosen nachdachten. Zeilinger, dem ich dafür einen Nobelpreis wünsche, hat bewiesen, dass die Fernwirkung zwischen den Quantenpartikeln über viele Kilometer reichen kann. Derartige Nichtlokalität widerspricht Konzepten vom lokalen Realismus, wie sie einst Einstein in seinem Dauerdisput mit Niels Bohr verfocht. In Einsteins Sicht sollten Messergebnisse lokalisierter Systeme vollständig durch deren physikalische Realität am Ort der Beobachtung festgelegt sein – und nicht zusätzlich durch ferne Ereignisse.

Doch neue Experimente speziell aus diesem Jahr scheinen zu zeigen, dass selbst ein nichtlokaler Realismus dem Quantenverhalten nicht gerecht wird *(Nature 446, S. 871)* – was auch Alain Aspect beunruhigt. Diese Resultate würden bedeuten, kommentierte er kürzlich,



dass man »auf die Art von Realität verzichten muss«, die er gerne gehabt hätte *(Nature 446, S. 866)*. Aber zugleich könnte sich diese »zweite Quantenrevolution aus ihrem jetzigen Zustand der Grundlagenforschung in eine vollwertige technologische Revolution« verwandeln.

Anton Zeilinger ist davon überzeugt, dass Quantenphysik – »wenn wir sie eines Tages wirklich verstanden haben« – noch revolutionärer sein wird als die Leistungen etwa von Kolumbus oder Kopernikus. »Es wird schlichtweg um die Frage gehen, was Wirklichkeit ist.« Wenn Sie Lust haben, sich selbst mit dem Quantenrätsel des Welle-Teilchen-Dualismus etwas näher zu befassen, dann hilft Ihnen unser Beitrag auf S. 68 sicher weiter – mit einem »Quantenradierer« zum selbst Basteln.

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer

INHALT

SPEKTROGRAMM

10 Blut für alle · Babys als Lippenleser · Ring aus Dunkler Materie · Langlebigkeitsgen · Kluge Hunde u. a.

13 **Bild des Monats**
Eiszeitliche Mammutskulptur

FORSCHUNG AKTUELL

14 **Wie Berge Platten bremsen**
Das Gewicht der Anden hemmt das Abtauchen einer ozeanischen Platte

16 **Vermessung der dunklen Seite des Kosmos**
Bislang größte Karte der Dunklen Materie im Universum erstellt

17 **Frisiertes Sonnenlicht**
Über das Kunststück, aus grünem Licht blaues zu machen

20 **Überraschungen aus dem Fress-Sack**
Wie Bakterien an heißen Quellen ein ganzes Tiefsee-Ökosystem ernähren

THEMEN

▶ **24** ETHOLOGIE
Wie intelligent sind Raben?

▶ **32** TITELTHEMA ASTRONOMIE
Methan auf fremden Himmelskörpern – Spur außerirdischen Lebens?

▶ **44** MEDIZIN
Schmerzforschung kommt voran

52 GEOLOGIE
Bremsklötze für Vulkanausbrüche

60 RÖMISCHES REICH
Baiae – das St. Tropez der Antike

▶ **68** MIKROPHYSIK
Quantenradierer selbst gemacht

80 FAHRZEUGTECHNIK
Wasserstoff im Tank – eine Frage der Speicherung

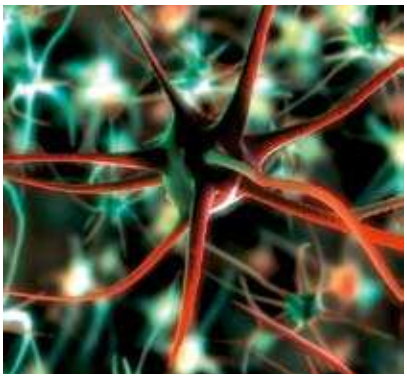
102 ESSAY
Von der Seelenverwandtschaft zwischen Mensch und Tier

SEITE 24

VERHALTENSFORSCHUNG

Intelligenztests für Raben

Der größte aller Singvögel meistert knifflige Aufgaben durch Nachdenken. Besondere Klugheit beweist er im Umgang mit Artgenossen



SEITE 44

MEDIZIN

Neue Wege aus der Pein

Ein besseres molekulares Verständnis der Signalverarbeitung in Nervenzellen bietet neue Ansätze zur Entwicklung von Medikamenten selbst gegen schlecht bekämpfbaren Schmerz

SEITE 52

GEOLOGIE

Warum Vulkane so selten ausbrechen

Eigentlich müsste es viel öfter Vulkanausbrüche geben. Doch Magma, das durch Spalten empordringt, bleibt meist stecken, bevor es die Oberfläche erreicht. Was ist der Grund dafür?

SEITE 60

ARCHÄOLOGIE

Antike Wellness

Im Nobelkurort Baiae ließen es sich reiche Römer einst gut gehen. Heiße Quellen und das milde Klima im Golf von Neapel waren der Gesundheit zuträglich – und rückten die strengen Sitten Roms in weite Ferne

TITELTHEMA ASTRONOMIE SEITE 32

Methan auf Mars und Titan

Die Existenz von Methan auf unserem Nachbarplaneten sowie dem größten Mond des Saturn stellt Astronomen und Planetologen vor ein Rätsel: Ist das Gas ein Indiz für Leben oder ein Produkt geochemischer Prozesse?

SEITE 68

MIKROPHYSIK

Quantenradierer

Ein verblüffender Effekt der Quantenmechanik lässt sich mit einfachen Mitteln daheim veranschaulichen. Wir geben eine Bastelanleitung für das Welle-oder-Teilchen-Experiment

SEITE 80

SERIE AUTO UND UMWELT (TEIL II): SPEICHERTECHNIK

Volltanken mit Wasserstoff

Wenn dereinst die Ölreserven schwinden, bietet sich Wasserstoff als Antriebsmittel für Fahrzeuge an. Doch noch bereitet die Speicherung Probleme

KOMMENTARE

21 NACHGEHAKT
Sauber, aber nicht rein

22 SPRINGERS EINWÜRFE
War jemals jemand auf dem Mond?

WISSENSCHAFT IM ...

42 **Alltag:** Satz und Sieg – der Tennisball

79 **Rückblick:** Elektrischer Stuhl für Unkraut · Aufblasbares Flugzeug · Kunstschatz aus dem Meer u. a.

JUNGE WISSENSCHAFT

88 **Roboter und ein spiritistischer Leuchttisch**
Bundeswettbewerb Jugend forscht 2007 (I)

REZENSIONEN

92 **Der Krieg der Astronomen**
von Arthur I. Miller
Die Könige der Lüfte von Peter Matthiessen
Body-Modification von Erich Kasten
Als die Wörter tanzen lernten
von Wolfgang Steinig

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

98 **Mukundis Krone**
Eine unscheinbare Figur entpuppt sich als überraschend vielseitiger Pflasterstein

WEITERE RUBRIKEN

3 **Editorial**
Quantenspuk und Realität

8 **Leserbriefe**

9 **Impressum**

95 **Preisrätsel-Lösung**

96 **Preisausschreiben**
Gewinnspiel um einen romantischen Abend zu zweit

106 **Vorschau**

Titelillustration: Ron Miller

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet; die mit 🔊 markierten Artikel können Sie als Audiodatei im Internet beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Spektrum ONLINE

◀ PLANETENFORSCHUNG

Tagebücher der Missionen zu Mars und Saturn

Die Roboter Spirit und Opportunity erkunden rollend die Oberfläche des Mars, während die europäische Sonde Mars Express aus ihrer Umlaufbahn einen scharfen Blick auf unseren Nachbarplaneten wirft. Die Weltraumsonde Cassini liefert Neuigkeiten in Hülle und Fülle vom Herrn der Ringe und seinen Monden. **spektrumdirekt** hält Sie über alle kleinen und großen Entdeckungen auf dem Laufenden

www.spektrumdirekt.de/mars, www.spektrumdirekt.de/cassini

◀ EIN WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFTLICHES EXPERIMENT

Preisausschreiben

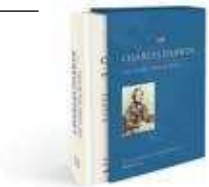
Alex und Bianca stehen am zarten, unsicheren Anfang einer Beziehung. Es kommt entscheidend darauf an, dass er errät, was sie darüber denkt, was er darüber denkt, was sie will … selbst wenn es um etwas so Banales wie die Bezahlung des gemeinsamen Abendessens geht. Entscheiden Sie mit in unserem Gewinnspiel auf S. 96 oder unter www.spektrum.de/preisausschreiben

5x5 Die Rezension des Monats von spektrumdirekt

	1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■ ■ ■ ■ ■
Didaktik	■ ■ ■ ■ ■
Suchen/Finden	■ ■ ■ ■
Lesespaß	■ ■ ■ ■ ■
Preis/Leistung	■ ■ ■ ■
Gesamtpunktzahl	23

◀ REZENSION

Charles Darwin: Die Fahrt der Beagle



Als zeitloser Klassiker des Genres ist Darwins Reisebericht ein Leseerlebnis. Denn neben aller wissenschaftlichen Detailfülle bricht sich immer wieder eine Neigung zur Geschichte, zum erzählten Erlebnis Bahn. Gerade Passagen, in denen eine seinerzeit noch wenig bekannte Welt geschildert wurde, machten einen Gutteil des zeitgenössischen Erfolgs des Werkes aus

Aus der Rezension von Ralf Steiner

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen finden Sie unter www.spektrumdirekt.de/5x5

◀ SPEKTRUM-PLUS: ZUSATZANGEBOT FÜR ABONNENTEN

Die Merkursonde BepiColombo

Raumforschung braucht langen Atem. Für 2013 ist der Start der europäischen Sonde geplant. Nach sechs Jahren Flugzeit soll sie dann mindestens ein Jahr lang den vergessenen Planeten aus der Nähe erforschen. Worum geht es bei der ehrgeizigen Mission?

Dieser Artikel ist für Abonnenten frei zugänglich unter www.spektrum-plus.de

Sie suchen einen Artikel aus einem früheren Heft von Spektrum der Wissenschaft?

Geben Sie auf www.spektrum.de einen oder mehrere charakteristische Begriffe in das Feld »Suche Artikel« ein, wählen Sie unter »Archiv« das gewünschte Heft oder geben Sie dort einen Suchbegriff ein. Alle Artikel ab Januar 1993 sind abrufbar; für Abonnenten kostenlos

PUBLIKATIONEN

zu Themen
in diesem Heft

ZUM ARTIKEL AUF SEITE 24

VERHALTEN

Pfifffige Plauderer

Intelligenz ist im Tierreich nicht auf Säuger beschränkt: Auch manche Vögel sind zu erstaunlichen Leistungen fähig – zum Beispiel Papageien
Kostenlose Leseprobe unter
www.spektrumverlag.de/artikel/849211

G&G DOSSIER 2/2006
Intelligenzbestien

Delfintherapie für Kinder

Vierbeiner im IQ-Test

Tierische Siegertypen

ZUM ARTIKEL AUF SEITE 32

TITAN

Schleier gelüftet

Nach dem Abstieg durch die undurchsichtige Atmosphäre des Saturnmonds Titan lieferte Huygens neue Erkenntnisse – und neue Rätsel

ASTROMOMIE HEUTE 4/2006
Huygens großer Auftritt

Wie Magnetfelder das All gestalten

Sonnenfinsternisse

Fliegende Sternwarte

ZUM ARTIKEL AUF SEITE 52

GEOLOGIE

Die Urgewalt der Supervulkane

Mikroskopisch kleine Aschekristalle liefern überraschende neue Erkenntnisse über die schwersten Vulkanausbrüche auf der Erde

SDW DOSSIER 1/2007
Naturgewalten

Bessere Vorhersage von Tsunamis

Manipulation von Wirbelstürmen?

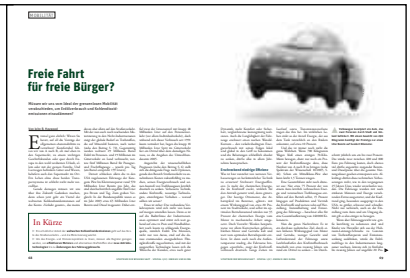
Meteoriten

ZUM ARTIKEL AUF SEITE 80

MOBILITÄT

Freie Fahrt?

Müssen wir uns vom Ideal der grenzenlosen Mobilität verabschieden, um Erdölverbrauch und Kohlendioxidausstoß einzudämmen?



SDW SPEZIAL 1/2007
Energie und Klima

Saubere Kohle

Sonne, Wind und Wasserstoff

Von Biogas bis Kernfusion

Diesen Artikel finden Sie als kostenlose Leseprobe im Internet. Unsere Sonder- und Monatshefte sind im Handel, im Internet oder direkt über den Verlag erhältlich

www.spektrum.de
service@spektrum.com
Telefon: 06221 9126-743

Missbrauch nicht ausgeschlossen

Peinliche Befragung
Springers Einwürfe, März 2007

Herr Springer meint zu Recht, dass Folter kein Mittel zur Wahrheitsfindung ist. Was mich schockiert:
1. Gelten die Menschenrechte nicht mehr?
»Niemand darf der Folter oder grausamer, unmenschlicher oder erniedrigender Behandlung oder Strafe unterworfen werden.«
2. Wer ist so naiv und glaubt, dass kein Missbrauch stattfinden würde – selbst wenn man eine (angeblich) enge Anwendung definieren würde –, dass diese nicht durch die Machthaber beliebig interpretiert werden könnte und würde? Dass die Definitionen nicht nach aktueller Tageslage und politischen Erwägungen (wer ist uns im Weg) angewendet werden würden?
3. Wissenschaftliche Erforschung, ob Folter der Wahrheitsfindung dient?
4. Auf welchem Weg sind wir, was ist unser Ziel? Unser Existenzrecht auf Teufel komm raus über das Existenzrecht der anderen zu stellen und jeden Widerstand bis zur eigenen Vernichtung zu bekämpfen?
5. Hat die Wissenschaft noch immer nicht aus den Erfahrungen der Willfährigkeit gegenüber politischen Systemen gelernt, für die Menschenrechte nur Hindernisse des Machterhalts der politischen Führer sind?

Willi Kolk, Gröbenzell

Asterix-Autor, -Zeichner

Asterix – ein Gallier?
Schwerpunkt Gallien, Mai 2007

Ihre Beiträge über die Gallier sind äußerst interessant. Allerdings hat sich auf S. 60, Kasten, ein schwer wiegender Fehler eingeschlichen: »… so wie es der Autor Albert Uderzo und der Zeichner René Goscinny entworfen haben.« Jeder richtige Asterixianer weiß natürlich, dass Uderzo für die Zeichnungen und Goscinny für die Texte verantwortlich war.

Dr. Eveline Fiedler und
Dr. Roland Müller-Fiedler, Leonberg

Anmerkung der Redaktion:
Die Leser haben Recht.

Rundungsfehler

Der Wyatt-Earp-Effekt, März 2007

Zum Essay von Herrn Bruss hätte ich eine Frage: Kann es sein, dass der vom Autor angegebene Wert von 0,35 Prozent für die Wahrscheinlichkeit, unter den ersten 5000 Stellen von Pi mindestens einmal eine Sequenz der Form …999999… zu finden, nicht korrekt ist? Ich hab's versucht nachzurechnen und komme etwa auf 0,45 Prozent.

Prof. Dr. Axel Stahl, Esslingen

Antwort des Autors F. Thomas Bruss:
Mein Dank an Herrn Stahl für seinen Leserbrief! Er hat Recht. Es lag am Rundungsfehler meiner (älteren) Software, die eine etwas ungewohnte Präzisionsdefinition braucht. Es soll in meinem Artikel also richtig heißen »… von etwa 0,45 Prozent«. Der auf acht Stellen genaue Wert ist 0,00448554. Andere Aussagen im Artikel sind davon nicht betroffen.

Rechenschieber und Generationenwechsel

Als Rechner noch geschoben wurden
April 2007

Danke für Ihren Artikel über den guten alten Rechenschieber. Erinnerungen werden wach an die Zeit, als er noch selbstverständlich war. Mein Sohn wollte schon als Zehnjähriger lernen, wie man damit umgeht, obwohl oder vielleicht weil er in einer Zeit zur Schule ging, als manche Lehrer noch Taschenrechner verbieten wollten. Mit vierzehn erlebte er dann in einer International School Unterricht am Taschenrechner; der Professor dachte: wennschon, dennschon. Während seine Mitschüler noch am Eintippen waren, nannte mein Sohn bereits das Resultat der kleinen Übungsrechnung und löste ungläubiges Staunen aus. Sein *sliderule* wurde wie ein Gerät vom Mars bestaunt. Der Professor aber änderte sogleich den Unterricht, erklärte das faszinierende Prinzip des »fremdartigen Dings« und löste große Begeisterung aus.

Inzwischen besitzt mein Sohn eine Sammlung verschiedenster Rechengeräte, die auf dem Verschieben von Skalen beruhen, in skurrilsten Ausführungen.

Dipl.-Ing. Herbert Köhler, Wien

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Götz Hoeppe, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke;
E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle (Ltg.), Christina Peiberg (stv. Ltg.), Sigrid Spies
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann (Online Coordinator), Ursula Wessels; Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg;
Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751;
Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Hubertus Breuer, Daniel Fischer, Dr. Peter John, Dr. Ursula Loos, Dr. Achim Schneider, Claus-Peter Sesín, Dr. Michael Springer

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de
Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Jürgen Ochs, Tel. 0211 6188-358, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, 10117 Berlin, Tel. 030 61686-150, Fax 030 6159005;
Hamburg: Siegfried Sippel, Brandstwiete 1 / 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-184, Fax 040 30183-283;
Düsseldorf: Hartmut Brendt, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099;
Frankfurt: Klaus-Dieter Mehnert, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4536, Fax 069 2424-4555;
Stuttgart: Dieter Drichel, Werastraße 23, 70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-45, Fax 0711 22475-49;
München: Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15/IV, 80331 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 28a vom 01. 01. 2007.

Gesamtherstellung: Vogel Druck- und Medienservice GmbH & Co. KG, 97204 Höchberg

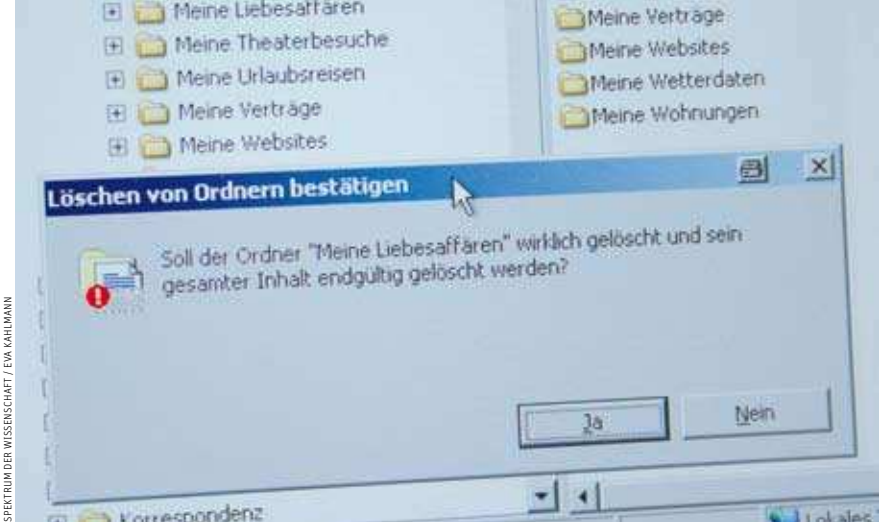
Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.
Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2007 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.
Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Brian Napack, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President/ Managing Director, International: Dean Sanderson

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

PRESSE Fachhandel



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EVA KAHLMANN

Alles gespeichert

Erinnerung total, Mai 2007

Noch werden wir gefragt, ob wir bestimmte Daten löschen wollen. Diese Freiheit wird uns hoffentlich unser Leben lang erhalten bleiben.

Hilfe für die Alten?

Als älterer Mensch wünsche ich mir manchmal ein besseres Gedächtnis. Aber eine generelle Aufzeichnung meines Lebens? Es gibt Situationen, in denen ich die Speicherung von Fotos/Videos für sinnvoll erachte, in anderen vielleicht nicht. Wenn aber die Maschine alles speichert, gebe ich meine Entscheidungsfreiheit auf. Auch der Einsatz von Filtern ist keine echte Lösung, da Filterprogramme Regeln benötigen, die wiederum zuvor festgelegt sein müssen und somit unter Umständen der Situation nicht adäquat sind. Deshalb muss ich unmittelbar vorher beziehungsweise in der Situation entscheiden können, ob ich die Datenermittlung wünsche. Außerdem möchte ich auch Aufzeichnungen löschen können.

Bei einer derartigen Wahlfreiheit macht zum Beispiel ein Gesundheitsprotokoll wiederum keinen Sinn. In anderen Fällen ist vielleicht eine Protokollierung erwünscht, etwa zur Beweissicherung. Aber ist mein Gegenüber damit einverstanden? Schließlich muss auch er das Recht haben, über seine Daten und damit über die Aufzeichnung der gemeinsam erlebten Situation zu verfügen.

Die technischen Möglichkeiten der Erfassung und Speicherung unseres Lebens sind – zumindest prinzipiell – vorhanden. Umso notwendiger ist es, bereits jetzt darüber nachzudenken, nach welchen Regeln wir unser Leben protokollieren können, sollen oder dürfen.

Hartmut Förtsch, Schwelm

Was speichern, was löschen?

Vergessen ist nicht mangelnde Fähigkeit des Gehirns, Erinnerungen zu speichern. Es ist vielmehr eine aktive Leistung des Gehirns, unter anderem um vergangene Erlebnisse richtig zu bewerten, Wichtiges von Irrelevantem zu trennen und in die aktuelle Gegenwart richtig einzuordnen sowie um frei zu sein für neue Eindrücke und das Hier und Jetzt unter angemessener Berücksichtigung der Erfahrungen zu bewältigen.

Ein Gehirn, das nicht vergessen kann, ist krank!

Viel häufiger ist allerdings das Problem der Fixierung auf vergangene Erlebnisse bei Depressionen, Posttraumatischen Belastungsstörungen, Neurosen et cetera, die es unmöglich macht, den gegenwärtigen Alltag befriedigend zu bewältigen.

Muss man eine an sich gesunde Leistung des Gehirns technisch unbedingt konterkarieren? Das Speichern aller Alltagserlebnisse ist problematisch; wichtiger, als alles zu speichern, ist zuerst die Frage, was es wert ist gespeichert und was es wert ist gelöscht zu werden. Sonst geht die Erkenntnis dessen, was wesentlich ist, endgültig im Datenmüll verloren.

Dr. Wolfgang Boese, Feldkirch, Österreich

Nicht ohne Löschtaste

Schön, wenn man alles aufzeichnen kann, was man so erlebt, Filme, die man sieht, Landschaften, Menschen, Musik aus dem Radio, Bücher, die man liest. Schön, all diese Sachen irgendwann mal wieder ansehen oder hören zu können, wenn man denn die Zeit dazu findet, aber bitte nicht ohne eine Möglichkeit, das Uninteressante gleich wieder zu löschen.

Wer hat schon ein zweites Leben, um alle Daten noch einmal durchzuarbeiten?

L. E. W. Schmidt, Kassel

Auch Wissenschaft nur eine Illusion

Die Fortschrittsillusion, April 2007

Selbstverständlich ist der Fortschritt aus den von Prof. Voland dargelegten Gründen eine Illusion. Doch das entlarvt nicht die Wissenschaft, denn diese ist selbst nur eine Vorstellung des Beobachters und daher am Ende dieselbe Illusion. Sie dient nur Nützlichkeitskriterien. Wie der Radikale Konstruktivismus klar zeigt, haben wir keinen Zutritt zur absoluten, objektiven Wirklichkeit, denn wir bleiben immer in unserer Autopoiese, die uns lediglich die Viabilität mit der Außenwelt ermöglicht, aber keine Einsicht in eine von uns unabhängige, wahre Wirklichkeit. Unser Gehirn bildet die Welt nicht durch unsere Sinnesorgane ab, wie sie wirklich ist, sondern wir erfahren durch Außenreize nur die Anregung und Feuerung unserer neuronalen Gehirnvernetzung, die uns dann eine Interpretation der Welt, aber nicht ihr Abbild liefert.

Das Bild der Welt, das wir glauben objektiv im Kopf zu haben, ist nur unsere Hypothese von der Welt. Wir schaffen uns die Welt, indem wir sie leben. Und das betrifft alle Bereiche, auch die Wissenschaft, auch die Mathematik, die auch nur eine Denkvorstellung ist. Die Wissenschaft arbeitet selbst mit vielen metaphysischen Axiomen, denn die letzte Beweisbarkeit gibt es nicht. Und der Mathematik fehlt das Anschauungsmaterial, um etwas mit Realität zu tun zu haben. Wir sind unsere eigene Realität, wir sind selbst das Leben, aber Realitäten objektivieren können wir nicht, auch nicht in der Wissenschaft. Das wissen die Philosophen des Ostens seit Jahrtausenden.

Reinhard Gutmann, Wien

Briefe an die Redaktion ...

... sind willkommen! Tragen Sie Ihren Leserbrief direkt in das Online-Formular beim jeweiligen Artikel ein (klicken Sie unter www.spektrum.de auf »Aktuelles Heft« beziehungsweise »Heftarchiv« und dann auf den Artikel).

Oder schreiben Sie mit Ihrer vollständigen Adresse an:
Spektrum der Wissenschaft
Frau Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg (Deutschland)
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

ALBERT GNIDICA, NEW YORK STATE MUSEUM

Aus dieser Versteinerung eines Teils der Kronenregion sowie Stammresten ließ sich der älteste bekannte Baum rekonstruieren (rechts).

PALÄOBOTANIK

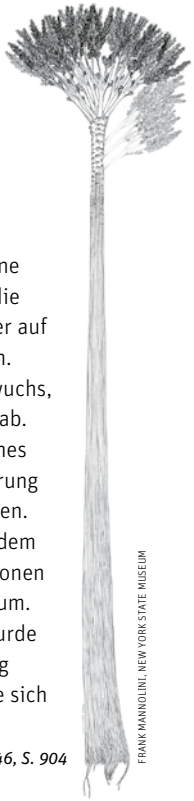
Fächerartiger Ur-Baum

Schon in den 1870er Jahren entdeckten Bauarbeiter in einem Steinbruch bei der Stadt Gilboa im US-Bundesstaat New York mächtige versteinerte Baumstümpfe. Sie sollten sich als Relikte des ältesten bekannten Waldes entpuppen, der hier vor über 385 Millionen Jahren – im Erdzeitalter des Mitteldevons – gestanden hatte.

Bis heute wusste jedoch niemand, wie die *Eospermatopteris* genannten Bäume denn nun aussahen. Der Fund weiterer Versteinerungen in der Nähe – eine Baumkrone und ein aus Bruchstücken rekonstruierter acht Meter langer Stamm – hat nun endlich das Geheimnis gelüftet. Demnach ähnelten die Bäume im äußeren Erscheinungsbild heutigen Baumfarnen oder Palmen. Allerdings trugen sie keine Blätter; vielmehr fächerten sich die Zweige in der Krone immer stärker auf und endeten in blattlosen Spitzen. Während der Baum in die Höhe wuchs, warf er die älteren, tieferen Äste ab. Diese dürften am Boden ein eigenes Biotop genährt und so zur Steigerung der Artenvielfalt beigetragen haben.

Bisher galt *Archaeopteris* aus dem Oberdevon (vor 385 bis 359 Millionen Jahren) als ältester bekannter Baum. Dieser Vorläufer der Koniferen wurde bis zu vierzig Meter hoch und trug Samen. Der Gilboa-Baum pflanzte sich dagegen über Sporen fort.

Nature, Bd. 446, S. 904



FRANK MANNOLINI, NEW YORK STATE MUSEUM

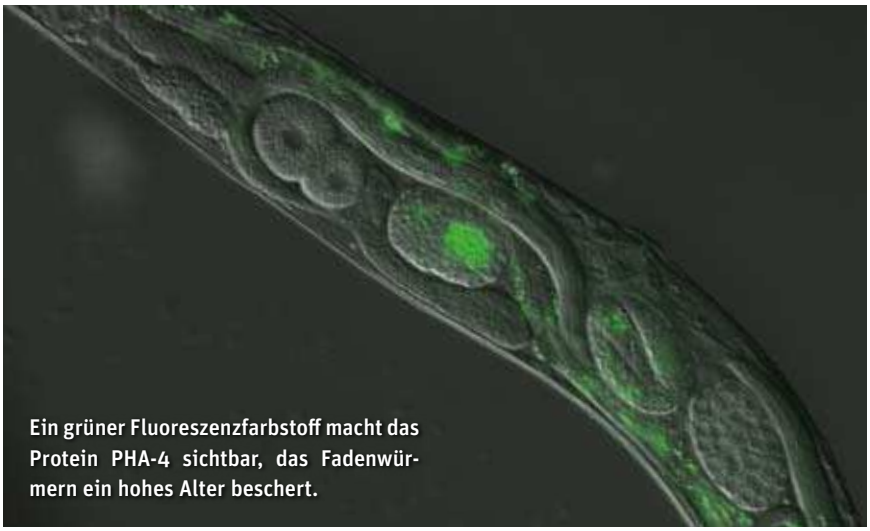
MOLEKULARBIOLOGIE

Gen für ein langes Leben

Wie wird ein Fadenwurm steinalt? Indem er fastet. Selbst wenn das Rezept auch beim Menschen funktionieren sollte, dürfte es allerdings den wenigsten behagen. Wer nicht gerade ein Hungerkünstler ist, hört deshalb sicher gern, dass nun Forscher um Andrew Dillin vom Salk Institute im kalifornischen La Jolla einen Weg gefunden haben, wie der Nematode *Caenorhabditis elegans* auch ohne Diät länger lebt. Die entscheidende Rolle spielt dabei ein Protein namens PHA-4. Kurbelten die Forscher seine Produktion künstlich an, verlängerte sich die Lebensspanne der Fadenwürmer trotz normaler Ernährung um bis zu dreißig Prozent. Wurde das Gen für PHA-4 dagegen gehemmt, verhalf auch Hungern nicht zu einem längeren Leben. Am besten wirkte beides: viel PHA-4 und wenig Futter. Mit diesem Rezept erreichten die Tiere ein nahezu biblisches Fadenwurmalter.

Auch der Mensch verfügt über Gene, die dem für PHA-4 ähneln. Sie gehören zur so genannten *Foxa*-Familie und sind für die Regulation des Glucagons zuständig, das als hormoneller Gegenspieler des Insulins den Blutzuckerspiegel erhöht. Dennoch ist derzeit offen, inwieweit sich die Ergebnisse von den Nematoden auf den Menschen übertragen lassen.

Nature, Bd. 447, S. 550



SILER H. PANOWSKI, SALK INSTITUTE FOR BIOLOGICAL STUDIES

Ein grüner Fluoreszenzfarbstoff macht das Protein PHA-4 sichtbar, das Fadenwürmern ein hohes Alter beschert.

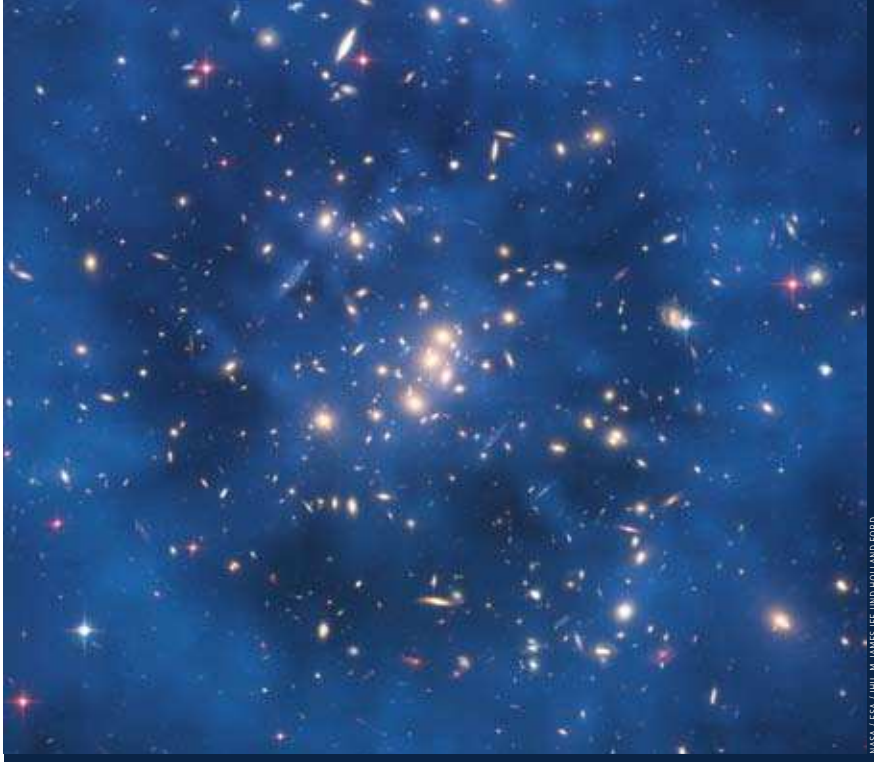
MEDIZIN

Blut für alle

Immer wieder kommt es zu Engpässen bei Blutkonserven in Krankenhäusern. Ein neues biotechnologisches Verfahren, das ein Wissenschaftlerteam aus den USA, Dänemark und Frankreich entwickelt hat, könnte dieses Problem schon bald entschärfen. Den Forschern ist es erstmals gelungen, die Blutgruppen A, B und AB in die allgemein verträgliche Gruppe 0 umzuwandeln. Die Buchstaben A und B stehen dabei für kleine Einheiten aus Zuckerketten und Proteinen, die auf der Außenseite der roten Blutkörperchen sitzen. Sie wirken als Antigene, die vom Immunsystem eines Menschen mit anderer Blutgruppe als fremd erkannt und bekämpft werden. Dadurch kommt es zur Verklumpung.

Schon vor mehr als 25 Jahren begannen Forscher deshalb mit der Suche nach Möglichkeiten, die problematischen Anhängsel von den roten Blutkörperchen zu entfernen. Ein erster Teilerfolg war die Entdeckung eines Enzyms in Kaffeebohnen, welches das B-Antigen abschneiden kann. Ein Team um den Dänen Henrik Clausen von der Universität Kopenhagen durchmusterte nun 2500 Pilze und Bakterien nach geeigneten molekularen Scheren. Dabei fand es nicht nur eine wirksamere Alternative für das Kaffee-Enzym, sondern erstmals auch ein Protein, welches das A-Antigen abtrennen kann. Klinische Studien sollen jetzt die Ergebnisse sichern und für die Praxis einsetzbar machen.

Nature Biotechnology, Bd. 25, S. 427



NASA / ESA / JHU, M. JAMES JEE UND HOLLAND FORD

In dieser Aufnahme des Galaxienhaufens ZwCl0024+1652 ist die ringförmige Ansammlung Dunkler Materie als bläuliche Wolke eingezeichnet.

ASTRONOMIE

Ring aus Dunkler Materie

Das Weltall ist erfüllt von einem unbekannten Stoff, der Licht weder abstrahlt noch verschluckt und mehr als fünfmal so häufig vorkommt wie gewöhnliche Materie. Darauf deuten viele Indizien hin: von der Rotationsbewegung der Galaxien bis zu Inhomogenitäten der kosmischen Hintergrundstrahlung. Nachweisbar ist die Dunkle Materie nur über ihre Gravitationswirkung, durch die sie etwa das Licht fernerer Sternsysteme ablenkt und so als Linse wirkt. Da ihre Verteilung aber grob mit derjenigen der sichtbaren Materie übereinstimmt, lassen sich beide mit solchen Beobachtungen normalerweise nicht auseinanderhalten.

Nun konnte ein internationales Forscherteam mit dem Weltraumteleskop Hubble erstmals eine Struktur aufspüren, die praktisch nur aus dem unsichtbaren Stoff besteht. Die Wissenschaftler vermaßen den Gravitationslinseneffekt, mit dem der fünf Milliarden Lichtjahre entfernte Galaxienhaufen ZwCl0024+1652 im Sternbild Fische Mehrfachbilder von Sternsystemen hinter ihm erzeugt. Daraus konnten sie auf seine Masseverteilung schließen.

Dabei fand sich außerhalb des leuchtenden Haufens eine ringförmige Ansammlung von Materie, die kein sichtbares Gegenstück hat. Vermutlich entstand sie als Folge der Kollision von ZwCl0024+1652 mit einem anderen Galaxienhaufen vor ein bis zwei Milliarden Jahren. Die Dunkle Materie der beiden Objekte prallte dabei vom Zentrum zurück und bildete so einen Ring mit einem Durchmesser von 2,6 Millionen Lichtjahren.

Presseinformation der Nasa

INTELLIGENZ

Hunde imitieren mit Verstand

Menschen und Tiere lernen, indem sie beobachtetes Verhalten nachahmen. Aber nur wir, meinen viele, denken uns etwas dabei. Nun haben Wissenschaftler um Friederike Range von der Universität Wien bewiesen: Auch des Menschen bester Freund, der Hund, äfft keineswegs planlos alles nach.

Die österreichischen Forscher orientierten sich an Versuchen, die zeigen, dass Säuglinge sich schon Gedanken über den Sinn der Handlungen ihrer Mitmenschen machen. Drückt ein Erwachsener einen Lichtschalter mit der Stirn, obwohl er die Hände frei hat, schließen die Kleinen, dass es einen tieferen Grund für die seltsame Methode geben müsse – und machen es genauso.

Anders, wenn die Hände der vorführenden Person gebunden sind: Dann glauben die Säuglinge die Ursache des ungewöhnlichen Verhaltens zu kennen und benutzen ihrerseits die viel praktischeren Finger. Was dem Menschen die Hände sind, ist dem Hund die Schnauze. Range und ihre Kollegen zeigten vierzig Vierbeinern einen trainierten Collie, der mit der Pfote eine Schaukel niederdrückte und dadurch Futter erhielt (Bild).

Das Ergebnis: Hatte der Vorführhund die Schnauze frei, verwendeten auch die anderen ihre Pfoten – offenbar vermuteten sie einen Sinn hinter der komplizierten Vorgehensweise des Collies. Trug das Vorbild jedoch einen Ball im Maul und hatte damit keine andere Wahl, als die Pfoten einzusetzen, benutzten die Zuschauer ihrerseits lieber die gewohnte Schnauze.

Current Biology, Bd. 15, S. 10

FRIEDERIKE RANGE, UNIVERSITÄT WIEN

Warum so kompliziert? Nachdenklich beäugt ein Artgenosse das Kunststück der Collie-Hündin.

ENTWICKLUNGSPSYCHOLOGIE

Babys als Lippenleser

Können Sie von den Lippen lesen? Nein? Wie wäre es dann damit? Sie schalten den Ton Ihres Fernsehers ab, wählen blind ein Programm und versuchen an den Mundbewegungen der Personen wenigstens zu erkennen, ob sie deutsch sprechen. Auch das gelingt Ihnen nicht?

Sorry, aber dann können Sie weniger als ein vier bis sechs Monate altes Baby. Wie man schon länger weiß, sind Säuglinge im Stande, ihre Muttersprache an deren Klang von einem fremden Idiom zu unterscheiden. Nun aber haben Wissenschaftler um Whitney Weikum von der Universität von British Columbia in Vancouver herausgefunden, dass das den Kleinen schon allein anhand der Lippenbewegungen gelingt. Die Forscher spielten amerikanischen Babys Videosequenzen ohne Ton vor, in denen verschiedene Personen abwechselnd englische und französische Sätze sagten. Die Reaktion der Babys fiel eindeutig aus: Sie waren weitaus aufmerksamer und schauten viel länger auf den Sprecher, wenn er ihre eigene Sprache benutzte; die Fremdsprache ignorierten sie weitestgehend.

Zum Trost sei Ihnen gesagt, dass sich diese Fähigkeit ab dem achten Monat wieder verliert. Offenbar ist sie nur eine vorübergehende Begleiterscheinung des Sprechenlernens. Mit ihr schwindet nämlich auch das Unterscheidungsvermögen von Säuglingen zwischen fremden Lauten, die in ihrer Muttersprache nicht vorkommen.

Science, Bd. 316, S. 1159

Auch ohne Ton hängt das Baby an den Lippen einer Person, die in seiner Muttersprache redet, und wendet sich von einer fremdsprachigen ab.

WHITNEY WEIKUM, UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA

PHILOSOPHIE

Aristoteles-Kommentar entdeckt

Unter der Textschicht eines Gebetbuchs aus dem 13. Jahrhundert kam jetzt ein Kommentar zu einem Werk des antiken griechischen Philosophen Aristoteles zum Vorschein. Der Autor der christlichen Handschrift hatte alte Pergamente wiederverwertet und überschrieben. Mit einer speziellen Digitalfotografie, die Aufnahmen bei verschiedenen Wellenlängen ermöglicht, konnten Forscher um William Noel von der Universität von Virginia in Charlottesville tiefer liegende Schichten der Buchseiten hervorheben und so die mit Bimsstein und Zitronensäure ausradierten Wörter lesbar machen. Den sensationellen Fund stellte die American Philosophical Society kürzlich in Philadelphia vor.

Bei dem bisher unbekannten Text, der nun analysiert werden muss, handelt es sich um die im 10. Jahrhundert in Konstantinopel entstandene Kopie eines Kommentars zu Aristoteles' Kategorienschrift, der wahrscheinlich aus der Feder von Alexander von Aphrodisias stammt. Dieser lebte um 200 n. Chr. in Athen und gilt als einer der wichtigsten antiken Aristoteles-Kommentatoren. Im selben Gebetbuch hatten Wissenschaftler schon vor zwei Jahren bedeutende Texte von zwei anderen antiken Gelehrten entdeckt: dem Naturwissenschaftler Archimedes und dem Politiker Hyperides. Heute befindet sich der so genannte Archimedes-Palimpsest im Walters Art Museum in Baltimore.

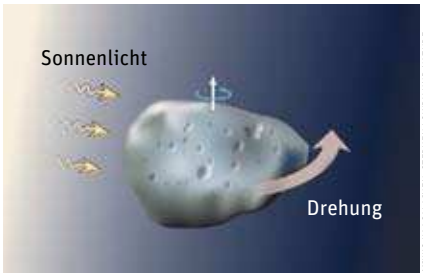
Die Falschfarbenaufnahme eines mittelalterlichen Gebetbuchs enthüllt einen ausradierten älteren Kommentar zu einer Schrift des Aristoteles.

EIGENTÜMER DES ARCHIMEDES PALIMPSEST

ASTRONOMIE

Sonnenlicht schubst Asteroiden an

Die Kleinplaneten im Sonnensystem rotieren entweder sehr schnell oder sehr langsam, und ihre Drehachsen verlaufen annähernd parallel. Theoretiker erklären dies mit dem Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack- oder kurz Yorp-Effekt.



MIKKO KAASALAINEN, STEPHEN LOWRY UND NATURE

Kartoffelförmige Asteroiden erfahren durch die ungleichmäßige Abstrahlung von Sonnenwärme einen Drehimpuls.

Er beruht darauf, dass Asteroiden meist unregelmäßig geformt sind. Dadurch erwärmt das Sonnenlicht ihre verschieden großen Oberflächenregionen unterschiedlich stark. Heißere Flächen strahlen aber mehr Wärme ab als kühlere und erfahren so einen etwas stärkeren Rückstoß. Das lässt den Asteroiden je nach seiner Orientierung und Drehrichtung schneller oder langsamer rotieren oder auch kippen. So kommt es zur Ungleichverteilung bei Geschwindigkeit und Achsrichtung.

Nun haben Forscher um Stephen Lowry von der Queen's University in Belfast (Nordirland) und Mikko Kaasalainen von der Universität Helsinki (Finnland) diesen bisher nur theoretisch postulierten Effekt bei zwei Asteroiden namens »2000 PH5« und »1862 Apollo« bestätigt. Anhand von Lichtkurven sowie Radarmessungen aus verschiedenen Jahren konnten sie die Änderung der Drehgeschwindigkeit ermitteln. Demnach dreht sich »1862 Apollo«, der für eine Rotation drei Stunden braucht, heute pro Sonnenumlauf einmal mehr als noch vor vierzig Jahren. Der kleinere »2000 PH5« wird seine Rotationsperiode von derzeit zwölf Minuten in rund 35 Millionen Jahren sogar auf weniger als 20 Sekunden verkürzt haben und dann wohl auseinanderbrechen.

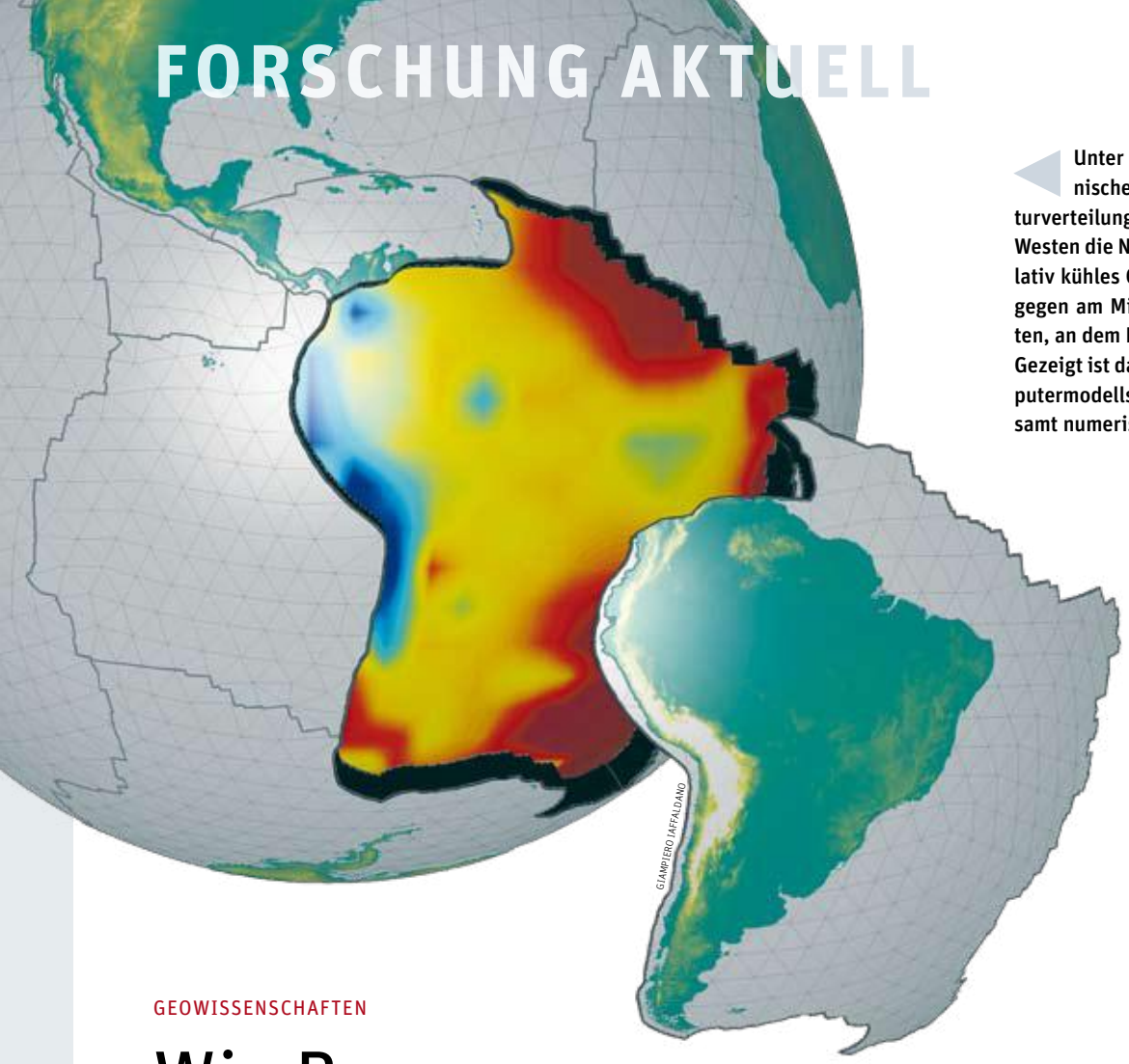
Nature, Bd. 446, S. 420, und Science , Bd. 316, S. 272

Mitarbeit: S. Hollstein und S. Hügler

Eiszeitliche Mammutskulptur

Fünf neue Zeugnisse figürlicher Kunst aus der Epoche des Aurignacien – vor rund 35 000 bis 28 000 Jahren – haben Forscher der Universität Tübingen bei Nachgrabungen in der Vogelherdhöhle im baden-württembergischen Lonetal entdeckt. Außer drei kleinen Fragmenten konnten sie ein größeres Bruchstück eines Löwen bergen. Der spektakulärste Fund aber ist diese 37 Millimeter lange Mammutfigur – die älteste komplett erhaltene Vollplastik aus Elfenbein weltweit. Insgesamt hat sich die Anzahl eiszeitlicher Elfenbeinschnitzereien von der Schwäbischen Alb damit auf 25 erhöht. »Kunst war in dieser Gegend vor etwa 35 000 Jahren also offenbar fest etabliert«, kommentiert Nicholas Conard vom Lehrstuhl für Ältere Urgeschichte und Quartärökologie an der Universität Tübingen.

UNIVERSITÄT TÜBINGEN / HILDE JENSEN



Unter der abgehobenen Südamerikanischen Platte erscheint die Temperaturverteilung im oberen Erdmantel. Wo im Westen die Nazca-Platte abtaucht, gleitet relativ kühles Gestein abwärts. Heiß ist es dagegen am Mittelatlantischen Rücken im Osten, an dem Material aus der Tiefe aufsteigt. Gezeigt ist das Ergebnis eines globalen Computermodells für die Mantelzirkulation mitsamt numerischem Gitter (feine Linien).

GEOWISSENSCHAFTEN

Wie Berge Platten bremsen

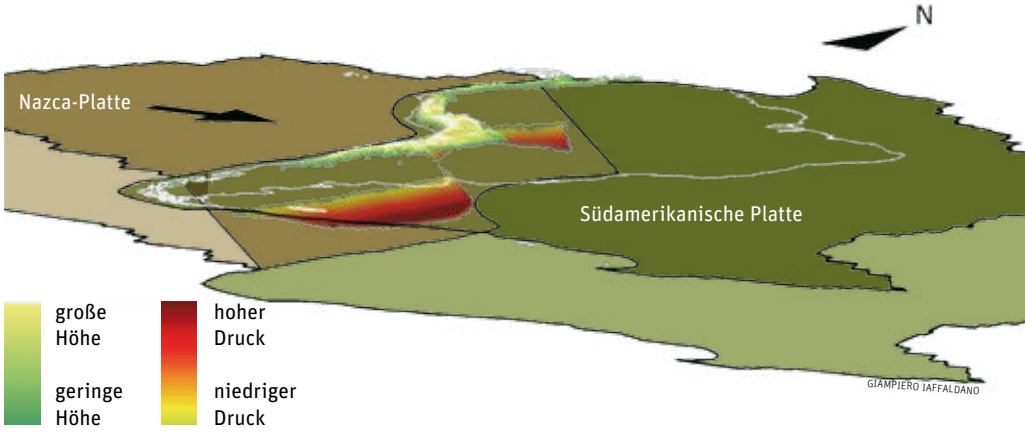
Computersimulation ergaben nun, dass in den vergangenen 10 Millionen Jahren das wachsende Andengebirge durch sein Gewicht die darunter abtauchende ozeanische Platte deutlich abgebremst hat.

Von Giampiero Iaffaldano

Nach der heute allgemein akzeptierten Theorie der Plattentektonik setzt sich die Lithosphäre – die feste äußere Schale unseres Planeten, die neben der Erdkruste auch die oberste Schicht des Erdmantels umfasst – aus mehreren großen Bruchstücken wie zum Beispiel Afrika, Australien oder Südamerika zusammen. Diese tektonischen Platten sind in sich weit gehend starr und treiben mit Geschwindigkeiten von einigen Zentimetern pro Jahr auf dem tieferen, zähplastischen Erdmantel. Dabei können sie aneinander entlanggleiten, sich voneinander entfernen oder miteinander kollidieren.

Gebirge entstehen, wo zwei Platten aufeinanderstoßen. Dabei schiebt sich die eine unter die andere – Geowissenschaftler sprechen von Subduktion. Die abtauchende Platte staucht den Rand ihres Kollisionspartners, wölbt ihn auf, zerbricht die Gesteinsblöcke und türmt sie übereinander. Auf diese Weise wurden sowohl die Kordilleren im Westen Amerikas als auch der Himalaya und die Alpen geschaffen. Wenn zwei Platten aneinander entlangschrammen, erzeugen sie durch die Reibung Erdbeben. Driften sie dagegen auseinander, quillt zwischen ihnen glutheißes Material aus dem Mantel empor und füllt die Lücke mit vulkanischem Gestein. Das geschieht zum Beispiel an den mittelozeanischen Rücken.

Trotz ihrer Erfolge bei der Erklärung geologischer Vorgänge hat die Theorie der Plattentektonik ein großes Manko. Sie beschreibt die Bewegung der Platten nur als kinematischen Prozess, ohne auf deren Ursache einzugehen. Zwar gelten Konvektionsprozesse im Erdmantel – walzenartige Wärmeausgleichsströme, wie sie auch in aufwallendem heißem Wasser kurz vor dem Sieden auftreten – gemeinhin als treibende Kraft. Doch der genaue Mechanismus ist noch unklar.



Die Anden üben Druck auf der Kontaktfläche zwischen der Nazca- und der Südamerikanischen Platte aus. Dadurch hat sich, wie Computersimulationen des Autors ergaben, die Geschwindigkeit, mit der die beiden Platten gegeneinander vorrücken, im Verlauf der letzten 10 Millionen Jahre um 30 Prozent verringert. Der Umriss Südamerikas ist durch eine weiße Linie skizziert.

Zieht die Strömung im Mantel die darüberliegende Platte mit? Oder rutscht diese einfach unter dem Einfluss der Schwerkraft von höher gelegenen Auf- zu tieferen Abstromzonen? Die Bedeutung und relative Stärke der verschiedenen möglichen Antriebskräfte ist noch ebenso wenig geklärt wie Art und Ausmaß bremsender Einflüsse. Auch weiß man nicht, wieso sich Plattenbewegungen im Verlauf der Erdgeschichte immer wieder – teils abrupt – geändert haben.

Inzwischen rückt jedoch die Dynamik der Lithosphäre zunehmend in den Blickpunkt der Geophysiker. Dabei haben Vergleiche zwischen geologischen und geodätischen Daten in jüngster Zeit faszinierende neue Erkenntnisse erbracht. Ein eindrucksvolles Beispiel findet sich in Südamerika. Dort schiebt sich die Nazca-Platte, die einen Teil des Pazifik-Bodens bildet, unter den Westrand des Kontinents. Erstaunlicherweise hat sich diese Bewegung, wie neuere Untersuchungen ergaben, in den vergangenen 10 Millionen Jahren um 30 Prozent verlangsamt. Aus welchem Grund? Die Suche nach der Antwort erbrachte jetzt interessante Einblicke in dynamische Vorgänge an Plattenrändern.

Nach dem Gesetz der Massenträgheit muss eine Änderung der Plattenbewegung mit vergleichbaren Änderungen bei den einwirkenden Kräften einhergehen. Aber wie soll man diese Kräfte ermitteln? Tektonische Prozesse lassen sich nicht im Labor nachvollziehen und dabei experimentell untersuchen. Deshalb bleibt nur, sie im Computer zu simulieren.

In den letzten zehn Jahren gab es beträchtliche Fortschritte bei der numerischen Behandlung von Mantelströmungen. Computermodelle können heute realistisch reproduzieren, wie im Verlauf von mehreren 10 Millionen Jahren riesige Konvektionswalzen entstehen, weil warmes Gesteinsmaterial, das durch radioaktiven Zerfall tief im Erdinnern erhitzt wurde, unter dem Einfluss von Auftriebskräften zur Oberfläche drängt, während kaltes und folglich dichteres Material absinkt. Auch die tektonischen Bewegungen der Lithosphäre lassen sich inzwischen sehr viel genauer simulieren als noch vor einem Jahrzehnt.

Auf diesen Fortschritten aufbauend, ist es mir an der Universität München zusammen mit meinem Doktorvater Hans-Peter Bunge kürzlich gelungen, zwei separate, hochkomplexe Computermodelle für Mantel und Lithosphäre miteinander zu koppeln. Das erlaubt uns nun, quasi durch Auflegen tektonischer Platten mitsamt ihrer Topografie auf das Mantelkonvektionsmodell, eine Beziehung zwischen realistischen Plattenbewegungen an der Oberfläche und den darunterliegenden Antriebskräften im Mantel herzustellen.

Klima greift ins Räderwerk der Plattentektonik ein

Auf diese Weise haben wir es geschafft, die Subduktion der Nazca- unter die Südamerikanische Platte während der letzten 10 Millionen Jahre zu simulieren. Insbesondere konnten wir dabei auch die beobachtete Verringerung der Abtauchgeschwindigkeit um 30 Prozent nachvollziehen.

Bedingung war allerdings, dass wir die Subduktion mit der Auffaltung der Anden, insbesondere dem Herausheben des Altiplano in unmittelbarer Nähe zur Plattengrenze, in Bezug setzten. Demnach wurde der Abtauchvorgang offenbar vor allem durch das in die Höhe wachsende Gebirge verlangsamt. Wie das gekoppelte Modell zeigt, haben die Anden durch ihr zunehmendes Gewicht im Verlauf der letzten 10 Millionen Jahre immer mehr Druck auf die sich darunterschiebende Nazca-Platte ausgeübt und sie so abgebremst.

Mit diesem überraschenden Ergebnis ist es unseres Wissens erstmals gelungen, Änderungen in der Driftgeschwindigkeit einer tektonischen Platte in einem Computermodell exakt zu reproduzieren – ein beachtlicher Fortschritt im Bereich der rechnergestützten Geodynamik. Dadurch steht nun fest: Große Gebirgszüge bestimmen als Schlüsselkräfte die Dynamik von Plattenvorgängen entscheidend mit.

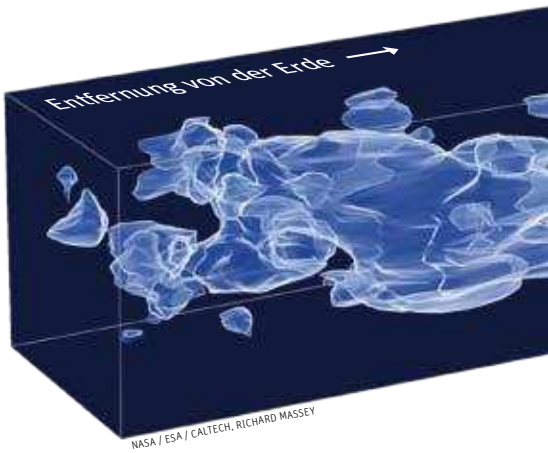
Überdies erlauben unsere Ergebnisse allgemeine Rückschlüsse auf geologische Prozesse und tragen so zu deren Verständnis bei. Zum einen legen sie nahe, dass der obere, kalte Teil einer Plattengrenze, der so genannte Sprödbereich, einen weit größeren Einfluß auf die Regulierung der Plattenbewegung ausübt als bisher angenommen. Dies ist wichtig für die Fortentwicklung entsprechender Computermodelle.

Zum anderen liefern unsere Befunde eine weitere Bestätigung für die vor rund zehn Jahren erstmals aufgestellte Hypothese, dass das Erdklima die Plattentektonik beeinflusst (Spektrum der Wissenschaft 2/2007, S. 52). Es gibt Hinweise, wonach das ohnehin schon trockene Klima in den Anden im Verlauf der letzten 10 Millionen Jahre noch arider wurde. Dadurch kam die Erosion fast völlig zum Stillstand – eine Grundvoraussetzung für die Bildung eines so ausgeprägten Gebirgsplateaus wie des Altiplano. Letzteres aber bremste gemäß unseren Simulationen die Plattenbewegung. Folglich hat ein Klimawandel indirekt in das Räderwerk der Tektonik eingegriffen und für einen wachsenden Bremsklotz gesorgt, der das Vorrücken der Nazca-Platte seither zunehmend hemmt.

Giampiero Iaffaldano promoviert in der Sektion Geophysik an der Abteilung für Geo- und Umweltwissenschaften der Universität München über die Kombination von Mantelkonvektions- und Lithosphärenmodellen.

ASTROPHYSIK

Kartierung der dunklen Seite des Kosmos



Astronomen haben die bislang größte Karte der Dunklen Materie im All erstellt. Dabei nutzten sie den schwachen Gravitationslinseneffekt, der bewirkt, dass Massenansammlungen die Bilder entfernter Galaxien verzerren.

Von Georg Wolschin

Unsichtbare Dinge zu lokalisieren, ist nicht einfach. Dennoch widmen sich Astronomen dieser Herausforderung mit wachsender Begeisterung – und haben dabei nun ihren bisher größten Erfolg erzielt.

Nach heutigem Kenntnisstand macht die gewöhnliche sichtbare Materie, die bis auf die sehr leichten Elektronen aus Neutronen und Protonen – so genannten Baryonen – besteht, nur rund vier Prozent dessen aus, was das Universum an Masse und Energie enthält. Gut fünfmal so viel, nämlich etwa 22 Prozent, entfällt auf die so genannte Dunkle Materie. Diese heißt so, weil sie weder normales Licht noch elektromagnetische Strahlung anderer Wellenlängen aussendet oder absorbiert. Dadurch bleibt sie komplett unsichtbar. Allerdings wirkt sie – im Gegensatz zur noch rätselhafteren Dunklen Energie, welche die restlichen 74 Prozent zum Inhalt des Universums beisteuert – über die Schwerkraft auf die baryonische Materie ein und kann genau wie diese durch ihre Gravitationswirkung Lichtwellen vom geraden Weg abbringen.

Das eröffnet eine Möglichkeit, die räumliche Verteilung dieser verborgenen Komponente des Kosmos zu ermitteln. Weil die dunkle und die baryonische Materie mit ihrem Gravitationspotenzial das Licht weit entfernter Galaxien ablenken, erscheinen deren zumeist ellipsenförmige Bilder verzerrt.

Allerdings ist der Effekt gewöhnlich sehr schwach, sodass die Verzerrung höchstens ein Prozent beträgt. Das lässt sich in Aufnahmen einzelner oder weniger Galaxien nicht erkennen. Beobachtet man jedoch viele Milchstraßensysteme über einen größeren Himmelsausschnitt, machen sich systematische Verzerrungen bemerkbar: Die Objekte um eine verborgene Gravitationslinse zeigen eine Tendenz, tangential zu ihr ausgerichtet zu sein. Dass diese Methode funktioniert, hat schon vor vier Jahren eine Astronomengruppe um Klaus Meisenheimer vom Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg und Andreas N. Taylor vom Königlichen Observatorium in Edinburgh (Schottland) nachgewiesen.

Nun konnten Mitglieder der Cosmos-Kollaboration, eines internationalen Teams von mehr als siebzig Wissenschaftlern, mit dieser Methode die bislang größte Karte der Dunklen Materie erstellen *(Nature, Bd. 445, S. 286, 2007)*. Als Grundlage diente die ebenfalls größte zusammenhängende Himmelsaufnahme, die das Weltraumteleskop Hubble bisher geliefert hat: ein Mosaik aus 575 leicht überlappenden Einstellungen der Advanced Camera for Surveys (ACS).

Insgesamt überdeckt es die neunfache Fläche der Vollmondscheibe. In dieser Aufnahme aus dem All, die nicht von Turbulenzen in der Erdatmosphäre verwischt ist, konnten die Forscher um Richard Massey vom California Institute for Technology in Pasadena (Kalifornien) die Gestalt von etwa 500 000 Galaxien präzise vermessen. Bei Folgebeobachtungen derselben Himmelsregion mit anderen Satelliten und irdischen Großteleskopen nahmen sie zudem deren Spektren auf und leiteten daraus die Entfernungen ab.

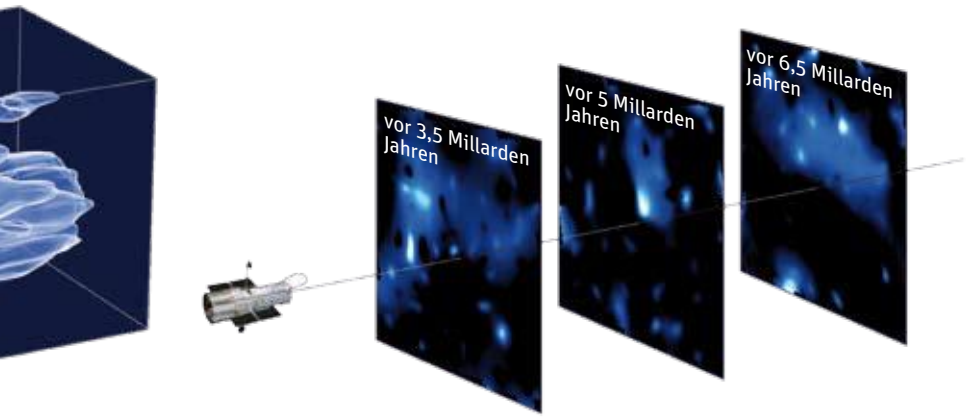
Verzerrte Galaxienbilder

Um die Verteilung der Dunklen Materie zu kartieren, schufen die Cosmos-Wissenschaftler von dem untersuchten dreidimensionalen Ausschnitt des Weltalls ein numerisches Modell im Computer und trugen darin die Positionen der Galaxien ein – zusammen mit einem Parameter, der beschreibt, wie das beobachtete Bild jeweils von der Kreisform abweicht. Dann modifizierten sie eine anfangs homogene Massendichte so lange, bis sich das gemessene Verzerrungsmuster aller 500 000 Galaxienbilder ergab. Dabei unterstellten sie, dass die Ausrichtung benachbarter Milchstraßensysteme voneinander unabhängig ist.

Das resultierende Modell beschreibt die Verteilung der Gesamtmasse im Raum einschließlich der baryonischen, sichtbaren Komponente. Deren Anteil mussten die Astronomen noch abziehen, um die gewünschte Karte der Dunklen Materie zu erhalten. Dazu schätzten sie die in Sternen enthaltene Masse, die sich aus den Leuchtstärken der Galaxien ergibt, sowie diejenige des heißen Gases, das die Galaxienhaufen erfüllt und sich durch Röntgenmessungen bestimmen lässt.

Die so schließlich erhaltene dreidimensionale Karte der Dunklen Materie reicht bis zu einer Entfernung von sieben Milliarden Lichtjahren in die Tiefe des Raums. Man darf sie sich allerdings nicht als Schnappschuss vorstellen; denn ihr Vorder- und Hintergrund liegen immerhin sieben Milliarden Jahre auseinander – ein halbes Weltalter, das nach jüngsten Erkenntnissen 13,7 Milliarden Jahre beträgt.

Diese Zeitdifferenz ist allerdings eher ein Vorteil als ein Manko – sollte sie doch im Prinzip erlauben, Modelle der kosmischen Strukturbildung zu überprüfen. Theoretischen Überlegungen und Computersimulationen zufolge entwickelten sich im Universum aus anfänglichen Quantenfluktuationen zunächst Verdichtungen von Dunkler Materie, in die dann die baryonische Materie einströmte und Sterne und Galaxien bildete. Demnach sollte sowohl die Dunkle als auch die baryonische Materie am Ende des untersuchten Zeitraums stärker verklumpt sein als am Anfang. Tatsächlich deutet sich dies in der Karte an.



Die dreidimensionale Karte (links) zeigt die Verteilung der Dunklen Materie in einem Ausschnitt des Universums mit einer Kantenlänge von 1,6 Winkelgraden. Der Abstand zur Erde nimmt von links nach rechts zu. Die drei Schnitte (rechts) geben das Verteilungsmuster vor 3,5, 5 und 6,5 Milliarden Jahren wieder, was 10,2, 8,7 und 7,2 Milliarden Jahren nach der Entstehung des Universums entspricht.

Es fragt sich jedoch, ob der untersuchte Himmelsausschnitt groß genug ist, um genauere Aussagen über die Strukturbildung zu ermöglichen. Diese fand ja vor allem in der Frühzeit des Universums statt, die in der jetzt erstellten Karte ausgeblendet bleibt. Man kann den Ausschnitt aber auch nicht ohne Weiteres vergrößern. Der untersuchte Himmelsbereich lässt sich zwar verbreitern, doch in puncto Tiefe unterliegt der schwache Gravitationslinseneffekt grundsätzlichen Einschränkungen.

Eine Gravitationslinse wirkt am besten, wenn sie sich auf halber Strecke zwischen Lichtquelle und Beobachter befindet. Aus diesem Grund ist die Tiefenschärfe bei mittleren Entfernungen am größten. Im kosmischen Nahbereich gibt es zu wenig ablenkende Galaxien und hinter dem von der Cosmos-Kollaboration untersuchten Ausschnitt sind die meisten frühen Milchstraßensysteme nicht mehr hell genug für die Beobachtung. Erst mit der nächsten Generation von Großteleskopen wird es möglicherweise gelingen, das Licht dieser fernen Objekte zu nutzen, um auch in die erste Hälfte der Geschichte des Universums vorzudringen.

Georg Wolschin lehrt an der Universität Heidelberg theoretische Physik.

PHYSIK Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Frisiertes Sonnenlicht

Mit einem Griff in die molekulare Trickkiste haben Forscher erstmals natürliches Licht zu höheren Frequenzen hin verschoben. Das eröffnet neue Möglichkeiten zur effizienteren Gewinnung von Solarenergie.

Von Stefan Maier

Das hehre Ziel der reinen Wissenschaft ist es, die Natur zu verstehen. Da Forschung aber von Menschen betrieben und von Steuergeldern bezahlt wird, folgt dem Erkenntnisgewinn vielfach dessen Verwertung in klingender Münze. So sind Entdeckung und Erfindung seit jeher zwei Seiten einer Medaille. Immer öfter gehen die Forscher aber noch einen Schritt weiter: Sie wollen die Natur nicht nur für nützliche Zwecke einspannen, sondern sie gar »verbessern« – man denke etwa an die gentechnische Veränderung von Pflanzen zur Steigerung ihrer Widerstandsfähigkeit und Ertragskraft.

In ähnlicher Weise haben Stanislav Baluschev und seine Kollegen am Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz nun ein Stück Natur den Erfordernissen der modernen Technologie angepasst: In einem raffinierten Experiment ist es ihnen gelungen, die Frequenz natürlicher Sonnenstrahlung zu erhöhen *(Physical Review Letters, Bd. 97, Artikel 143903)*. Genauer gesagt, machten sie aus grünem Licht blaues.

Da stellt sich natürlich sofort die Frage: wozu? Ist blaues Licht etwa schöner als grünes? Das dürfte Geschmacksache sein. Den Forschern ging es denn auch um etwas anderes: Energiegewinnung mit Solarzellen. Und da spielt die Farbe eine große Rolle. Die Energie der Lichtquanten wächst nämlich proportional zu ihrer Frequenz; deshalb sind kurzwelligere »blaue« Photonen energiereicher als »grüne«.

Solarzellen können nur einen Teil des Sonnenlichts absorbieren und in nutzbaren Strom umwandeln; denn die Photonen müssen in der Lage sein, den Halbleiteratomen Elektronen zu entreißen. Das schaffen ausschließlich diejenigen, deren Energie einen vom Typ der Solarzelle abhängigen Schwellenwert überschreitet. Alle anderen sind für die Stromgewinnung verloren – es sei denn, sie werden zu höheren Frequenzen verschoben. Gelingt das, könnte der zuvor unbrauchbare langwellige Anteil des Sonnenlichts aufgewertet und für die Energieerzeugung herangezogen werden. Erfreuliche Konsequenz: Der Wirkungsgrad der Solarzellen würde steigen.

Diese Form der Frequenzumwandlung heißt in der Fachwelt »Hochkonvertierung«. Dabei werden zwei Photonen in ein einzelnes mit der doppelten Energie transformiert. Dieses Kunststück vollbringen bestimmte, in der Natur vorkom- ▷

Als Abonnent haben Sie viele Vorteile!

1. Sie sparen gegenüber dem Einzelkauf und zahlen pro Heft nur € 6,30 statt € 6,90. Als Schüler, Student oder Azubi zahlen Sie sogar nur € 5,45.

2. Sie haben online freien Zugang zu allen Spektrum-Ausgaben seit 1993 mit derzeit über 6000 Artikeln.

3. Unter **www.spektrum-plus.de** finden Sie jeden Monat einen kostenlosen Zusatzartikel, der nicht im Heft erscheint.

4. Sie erhalten für Ihre Bestellung ein Dankeschön Ihrer Wahl.

5. Sie können die Online-Wissenschaftszeitung »spektrumdirekt« günstiger beziehen.

6. Auf dieser Seite und unter **www.spektrum-plus.de** finden Sie unser Produkt des Monats, das Sie als Abonnent mit Preisvorteil bestellen können.

Zum Bestellen einfach nebenstehende Karte ausfüllen und abschicken oder

per Telefon: 06221 9126-743
per Fax: 06221 9126-751
per E-Mail: service@spektrum.com
oder per Internet:

www.spektrum.de/abo

Abonnieren oder verschenken

Wenn Sie Spektrum der Wissenschaft selbst abonnieren oder verschenken, bedanken wir uns bei Ihnen mit einem Präsent. Wenn Sie ein Geschenkabo bestellen, verschicken wir das erste Heft zusammen mit einer Grußkarte in Ihrem Namen.

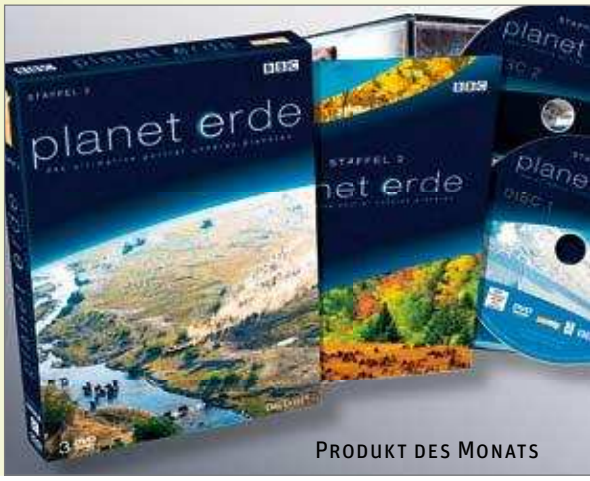
Buch »Was macht das Licht wenn's dunkel ist?«
Hier beantworten Experten Fragen, die wir schon immer einmal stellen wollten.

Leser werben Leser

Sie haben uns einen neuen Abonnenten vermittelt? Dann haben Sie sich eine Dankesprämie verdient!

Toolbag von Reisenthel:
enthält alles, was für Reparaturen im Haushalt benötigt wird.

Produkt des Monats



Produkt des Monats

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstr. 3–5 | 69126 Heidelberg | Telefon 06221 9126-600 | Telefax 06221 9126-751 | www.spektrum.de | Geschäftsführer: Markus Bossle, Thomas Bleck | Amtsgericht Mannheim | HRB 338114 | Abonnementsverwaltung: ZENIT Pressevertrieb GmbH | Julius-Hölder-Str. 47 | 70597 Stuttgart | Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

▷ mende Moleküle. Absorbiert ein solches Molekül zwei kurz hintereinander eintreffende Photonen, leitet es deren Energiesumme an ein einzelnes Elektron weiter. Dieses wird dadurch auf ein höheres Niveau befördert. Wenn es von dort nur winzige Sekundenbruchteile später in seinen Grundzustand zurückfällt, gibt es die Energiedifferenz in Form eines einzelnen Photons wieder ab. Damit hat es die Energie der beiden ursprünglichen Lichtquanten gleichsam aufaddiert.

Doch leider lässt sich dieser Vorgang nicht ohne Weiteres zur Frequenzerhöhung von Sonnenlicht einsetzen. Er funktioniert nämlich nur unter zwei Bedingungen. Zum einen müssen die beiden absorbierten Lichtquanten fast gleichzeitig auf das Molekül treffen. Das setzt voraus, dass die Dichte der Photonen und somit die Intensität des anregenden Strahls ungefähr eine Million Mal höher ist als in Sonnenlicht. Eine so starke Fokussierung aber lässt sich selbst mit der besten Linse nicht erzielen. Zum anderen erfordert die effiziente Zwei-Photonen-Absorption durch ein Molekül, dass die Wellenpakete der beiden Lichtquanten im Gleichtakt schwingen. Daher waren für alle bisher durchgeführten Hochkonvertierungen Laser nötig. Das inkohärente Licht der Sonne oder einer Glühlampe eignete sich nicht.

Molekularer Verwandlungstrick

Wie schafften es die Mainzer Forscher trotzdem, das Kunststück mit den schwachen, nichtkohärenten Sonnenstrahlen zu vollbringen? Der Trick bestand darin, statt nur eines einzelnen zwei verschiedene Moleküle einzuspannen. Das veränderte die Physik des Vorgangs grundlegend.

Das eine Molekül kann mit hoher Ausbeute grünes Licht absorbieren, das andere blaues aussenden. Damit die Erklärung nicht zu umständlich gerät, erlaube ich mir im Folgenden eine Vereinfachung: Ich möchte die Moleküle ebenso wie die beteiligten Photonen unabhängig von ihrer tatsächlichen Farbe einfach als »grün« oder »blau« bezeichnen. Das macht die Erläuterung zugleich anschaulicher.

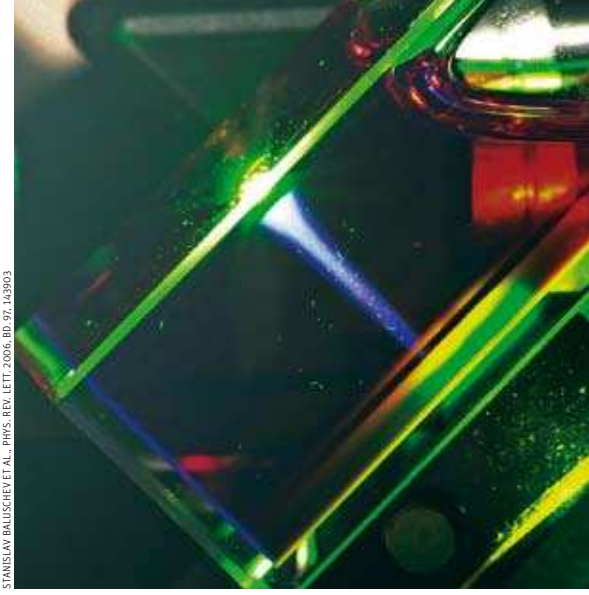
Fangen wir mit dem grünen Molekül an. Es enthält einen Porphyrinring, wie er auch im roten Blutfarbstoff und im Chlorophyll der Pflanzen vorkommt, und in seinem Zentrum sitzt das Schwermetallatom Palladium. Wenn ein grünes Photon auf das Molekül trifft, wird es verschluckt und ein Elektron angeregt. Dafür genügt ganz normales Licht.

Das grüne Molekül hat aber noch eine andere wichtige Eigenschaft: Es sorgt dafür, dass das angeregte Elektron nicht sofort wieder in den Grundzustand zurückfällt, sondern die Energie für verhältnismäßig lange Zeit speichert. Das wird möglich, weil das Elektron von dem angeregten Niveau erst einmal in ein benachbartes übergeht, das Physiker als Triplettzustand bezeichnen. Der Sprung von dort zurück auf das Grundniveau ist wegen quantenmechanischer Prinzipien dann stark gehemmt.

Gerät das grüne Molekül mit seinem angeregten Elektron in einem langlebigen Triplettzustand nun in die Nähe eines blauen Moleküls, kommt es zu einem Bäumchen-wechsel-dich-Spiel: Die beiden vertauschen durch einen noch immer nicht genau verstandenen Vorgang ihre Zustände. Danach befindet sich also im blauen statt im grünen Molekül ein Elektron auf dem Triplettniveau. Auch dieses sitzt nun gleichsam in der Falle und schafft erst nach einiger Zeit die Rückkehr in den Grundzustand. Wie Messungen ergaben, verstreichen bis dahin – gerechnet seit der Anregung des grünen Moleküls – im Mittel etwa fünf Mikrosekunden, was für Lichtabsorptionsprozesse extrem lang ist.

Während dieser vergleichsweise riesigen Zeitspanne kann sich in der Lösung eine große Menge angeregter blauer Moleküle in Triplettzuständen ansammeln. Schließlich werden es so viele, dass sie sich öfter anrempeln. Dabei geschieht gelegentlich, was auch im Gedränge von Einkaufspassagen passiert: Ein Molekül bestiehlt seinen Nachbarn; es übernimmt einfach dessen Energie und hat nun eine doppelte Portion davon. Durch den Diebstahl gelangt das Molekül in einen entsprechend höheren Zustand. Von dort aber ist die Rückkehr auf das Grundniveau nicht mehr behindert. Das Elektron fällt also brav herab und sendet dabei das gewünschte blaue Photon mit der doppelten Energie des grünen aus.

Da es bei jedem Teilschritt Verluste gibt, war die Gesamtausbeute bei dem Experiment der Max-Planck-Forscher zwar nicht besonders groß – für ein einzelnes blaues Photon brauchte es nicht nur zwei, sondern rund hundert grüne Photonen. Außerdem musste das grüne Licht erst aus der Sonnenstrahlung herausgefiltert und mit Linsen hundertfach verstärkt werden. Doch das grämte die Wissenschaftler kaum. Schließlich wollten sie vorerst nur den Nachweis der prinzipiellen Machbarkeit erbringen.



STANISLAV BALUSCHEV ET AL., PHYS. REV. LETT. 2006, BD. 97, 143903

Magische Transformation: Gewöhnliches grünes Licht, das auf eine Küvette mit einer speziellen Flüssigkeit fokussiert ist, erzeugt darin einen blauen Strahl. Die Energie der Lichtquanten wird dabei annähernd verdoppelt.

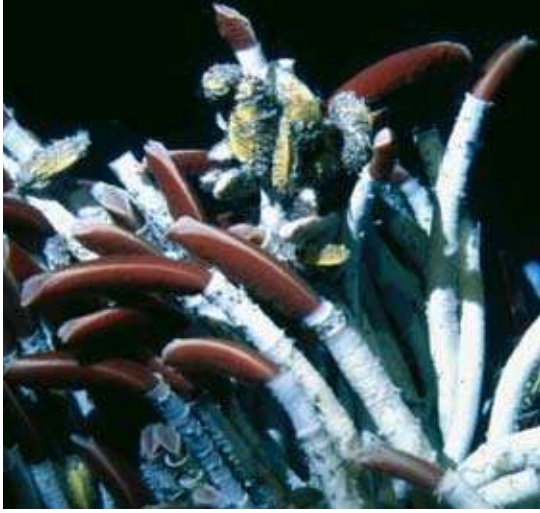
Dass es noch großer Anstrengung bedarf, bis ein industrieller Einsatz winkt, ist Baluschev und seinen Kollegen sehr wohl bewusst. Nicht nur die Ausbeute gilt es zu steigern, auch der Frequenzbereich muss angepasst werden. Die Hochkonvertierung von grünem in blaues Licht bringt lediglich bei Solarzellen aus organischen Kunststoffen, die meist ausschließlich Strahlung am oberen Ende des optischen Spektralbereichs absorbieren, einen höheren Wirkungsgrad. Die üblichen Solarzellen aus Silizium würden dagegen nicht davon profitieren; denn sie nutzen bereits das gesamte sichtbare Sonnenlicht. Hier müsste Strahlung aus dem infraroten Bereich hochtransformiert werden, damit es zu einer wesentlichen Verbesserung kommt.

Die Chancen dazu stehen indes nicht schlecht. Bei welcher Wellenlänge die molekularen Mittelsmänner Photonen absorbieren, hängt nämlich stark von dem eingebetteten Metallatom ab. Da aber ist die Auswahl groß. Und so bieten sich den Forschern noch reichlich Möglichkeiten, am Licht der Sonne herumzubasteln – und der ist das zum Glück völlig schnuppe.

Stefan Maier ist Professor für Physik an der Universität Bath (Großbritannien).

MIKROBIOLOGIE

Überraschungen aus dem Fress-Sack



MONIKA BRIGHT, UNIVERSITÄT WIEN

An heißen Tiefseequellen leben Röhrenwürmer, von denen nur ein Paar roter Kiemen aus einer Kalkröhre herausragt, in Symbiose mit Schwefelbakterien. Wie diese Lebensgemeinschaft funktioniert, ließ sich jetzt genauer aufklären.

Wie produzieren Bakterien an heißen Tiefseequellen Nahrung für ein ganzes Ökosystem? Teils machen sie es den Pflanzen nach, teils aber stellen sie auch, wie sich nun zeigte, einen bekannten Stoffwechselweg auf den Kopf.

Von Michael Groß

Die exotischen Biotope rund um warme Quellen und Schwarze Raucher in der Tiefsee beziehen ihre Energie nicht aus Sonnenlicht, sondern aus der Oxidation von Schwefelwasserstoff und Sulfiden, die mit dem heißen Quellwasser aus der Tiefe kommen. Ihre auffälligsten Bewohner, die Röhrenwürmer *(Riftia pachyptila)*, haben denn auch keines der im Tierreich üblichen Organe zur Nahrungsaufnahme und -verarbeitung wie Mund, Magen oder Darm. Aus einer weißen Kalkröhre ragt nur jeweils ein Paar leuchtend roter Kiemen. Ihre Nährstoffe erhalten die Würmer von bisher namenlosen Schwefelbakterien, mit denen sie in Symbiose leben. Diesen bieten sie in einer Art Sack am Fuß der Röhre, dem Trophosom, Herberge und eine geregelte Versorgung mit Schwefelwasserstoff, Sauerstoff und weiteren Chemikalien.

Wie die Ernährung dieser ungewöhnlichen Lebensgemeinschaft genau vonstattengeht, war lange völlig unklar, da die Röhrenwürmer nur schwer in Gefangenschaft zu halten sind und die Schwefelbakterien bis heute nicht kultiviert werden konnten. Vor zwei Jahren lieferte das Team von Jason Flores an der Pennsylvania State University in University Park jedoch zumindest erste Einblicke, indem es die dreidimensionale Struktur des Hämoglobins aus *Riftia pachyptila* ermittelte *(Proceedings of the National Academy of Sciences USA, Bd. 102, S. 2713)*.

Zusätzlich zu den Eisen-Ionen, die in unserem und allen anderen bekannten Hämoglobinen als Andockstelle für den Sauerstoff dienen, enthält die Version des Röhrenwurms demnach zwölf Zink-Ionen, die einen großen Teil der Sulfidfracht binden. Das erklärt, wie es den Würmern gelingt, Schwefelwasserstoff und Sauerstoff gleichzeitig von den Kiemen zum Trophosom zu transportieren, ohne dass es vorzeitig zu einer »Verbrennung« kommt, bei der die chemische Energie nutzlos verpuffen würde.

Doch was passiert am Ende dieses Transportwegs, wenn die Bakterien ihren Chemiebaukasten aus Schwefel, Kohlenstoff und Sauerstoff bekommen haben und daraus etwas Nützliches basteln sollen? Thomas Schweder und seine Mitarbeiter am Institut für Marine Biotechnologie in Greifswald konnten zusammen mit Kollegen in Kalifornien jetzt interessante Erkenntnisse darüber gewinnen *(Science, Bd. 315, S. 247)*.

Bestandsaufnahme aller Proteine

Da die Züchtung der Mikroben im Labor noch nicht gelungen ist und vielleicht nie gelingen wird, mussten die Forscher sich an Material halten, das sie direkt aus dem Trophosom der Röhrenwürmer gewinnen konnten. Dabei stand ihnen das Glück zur Seite: Ihre Probe erwies sich bei der Analyse der enthaltenen DNA als hochgradig rein. Die enthaltenen Biomoleküle stammten also nur von einer einzigen Spezies, nämlich dem Symbiosepartner des Wurms.

Um genauer zu verstehen, welche Stoffwechselwege die Bakterien benutzen, machten die Forscher eine Bestandsaufnahme sämtlicher Proteine, die im Innern der Mikroben vorkommen. Dazu unterwarfen sie den Zellinhalt einer zweidimensionalen Gel-Elektrophorese. Bei diesem Verfahren wandern die vorhandenen Eiweißstoffe durch ein quadratisches Gel und werden dabei zunächst nach ihrer Ladung und dann senkrecht dazu nach ihrer Masse aufgetrennt. Unterschiedliche Proteine erscheinen am Ende als isolierte Punkte und können durch Färbung sichtbar gemacht sowie auf ihre Zusammensetzung – sprich Abfolge der Aminosäuren – analysiert werden. Durch Vergleich der Sequenzen mit denen bekannter Proteine, die in riesigen Datenbanken vorliegen, lässt sich dann die mutmaßliche Funktion des betreffenden Eiweißstoffs ermitteln.

Das ist natürlich eine Mammutaufgabe. Immerhin konnten die Forscher inzwischen mehr als 220 der in den Schwefelbakterien vorkommenden Proteine durch Sequenzvergleich identifizieren. Darunter waren auch zahlreiche Stoffwechselenzyme. Einige davon entsprachen den Erwartungen, andere aber sorgten für Überraschungen.

Da die Bakterien in der Tiefsee sozusagen die Pflanzen als Primärproduzenten organischen Materials vertreten, liegt die Vermutung nahe, dass sie ebenso wie diese den so genannten Calvin-Zyklus zum Aufbau von Kohlenstoffverbindungen aus Kohlendioxid und Wasser benutzen. Die dafür nötige Energie stammt allerdings nicht aus der Photosynthese, sondern aus der Oxidation von Schwefelverbindungen. Tatsächlich entdeckten die Greifswalder Forscher die Enzyme, die am Calvin-Zyklus mitwirken.

Doch die Mengenverhältnisse unterschieden sich in unerwarteter Weise. So war ausgerechnet das Enzym Rubisco (Ribulosebisphosphat-Carboxylase) – es katalysiert den entscheidenden Schritt im Calvin-Zyklus, in dem Kohlendioxid an ein Vorläufer-Zuckermolekül gebunden wird – nur spärlich vorhanden. Während es in Pflanzen bis zu fünfzig Prozent des Eiweißinventars ausmacht und damit noch vor dem Kollagen das ▷

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Sauber, aber nicht rein

Arbeiten Kernkraftwerke wirklich CO_2-frei?

»Kernkraftwerke erzeugen mehr CO_2 als Braunkohlekraftwerke.« Mit dieser gewagten Behauptung wollte der SPD-Vorsitzende Kurt Beck Anfang März in einem Interview für die Tagesschau als Energiefachmann punkten – und machte eine kapitale Bauchlandung. Die Behauptung lässt sich auch mit Blick durch die rosarote Parteibrille nicht richtig rechnen. Selbst ein Braunkohlekraftwerk neuester Bauart pustet mit jeder erzeugten Kilowattstunde etwa 980 Gramm Kohlendioxid in die Luft – keine andere Stromquelle kommt auf so hohe Werte, schon gar nicht die Kernenergie.

Zu Kurt Becks Ehrenrettung darf man annehmen, dass er eigentlich etwas anderes sagen wollte: Auch die Kernenergie ist nicht CO_2-frei. Hier wäre der SPD-Chef auf der sicheren Seite gewesen, denn jede Form der Stromerzeugung verursacht Emissionen – auch wenn die großen Energiekonzerne der Öffentlichkeit gerne das Märchen vom Null-Emissions-Kernkraftwerk erzählen. Zwischen 8 und 32 Gramm Kohlendioxid stößt ein Atommeiler pro Kilowattstunde aus; das Ökoinstitut kommt sogar auf bis zu 126 Gramm. Diese Emissionen fallen allerdings nicht im Betrieb an, sondern in vorgelagerten Prozessen wie Gewinnung, Anreicherung und Transport von Uran-Brennstoff oder beim Bau eines Atommeilers.

Auch regenerative Energien sind übrigens nicht CO_2-frei. Während eine Windkraftanlage moderate 16 bis 23 Gramm pro Kilowattstunde bei Bau und Wartung ausstößt, sind es bei der Photovoltaik wegen der energieintensiven Herstellung des Halbleitermaterials immerhin rund 150 Gramm. Die Werte schwanken allerdings mit der Lebensdauer. Wenn diese deutlich länger ist als die meist angenommenen 20 Jahre, sinkt der Ausstoß.

Dass die Schwankungsbreiten gerade für die Kernenergie so groß sind, liegt nicht nur an der unterschiedlichen politischen Interpretation. Auch die Wissenschaft rechnet CO_2-Bilanzen nach verschiedenen Methoden aus. Da wäre zum Beispiel die Prozesskettenanalyse nach ISO 14040. Sie fordert, dass alle der Energieerzeugung vor- und nachgelagerten Prozesse in die Bilanz einbezogen werden. Doch das geht gar nicht. Rechnet man den Energieaufwand für den Bau von Bahnstrecken ein, die zum Transport von Uran-Brennstoff oder Kohle dienen, auch wenn meistens ICEs darüberrollen? Welchen Beitrag liefert der Bau der Hüttenanlage, in dem der Stahl für die Gleise hergestellt wird? »Irgendwo muss man abschneiden«, sagt Alfred Voß, Leiter des Instituts für Energiewirtschaft und rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart, das für Bundesregierung und Europäische Union Kosten- und Klimabilanzen errechnet.

Wie gross die Fehler durchs Weglassen sind, lässt sich mit der Prozesskettenanalyse nicht genau sagen. Deshalb erstellen die Stuttgarter ihre Öko-Bilanzen mit dem so genannten Hybrid-Ansatz. Mit dem hier zusätzlich verwendeten Input-Output-Modell der volkswirtschaftlichen Produktionsverflechtung lassen sich alle Prozesse ins Kalkül ziehen. Angewendet auf die Stromerzeugung liefere dieser Ansatz etwas höhere CO_2-Werte pro Kilowattstunde, so Voß.

Doch auch diese Kalkulation enthält einige Unbekannte: So wird für die Energieversorgung aller Prozesse ein Energiemix postuliert, der aber woanders – etwa in Ländern, wo Uran abgebaut wird – deutlich vom deutschen abweichen kann. Je nach Rechenmodell und Wahl der Anfangsbedingungen kann es zu mehr oder weniger großen Abweichungen in der CO_2-Bilanz kommen – bei der Kernenergie von mehreren hundert Prozent. Doch diese Abweichungen hält Voß hier wie auch bei den regenerativen Energien für unkritisch, weil die Werte so oder so niedrig seien. Der CO_2-Ausstoß stecke eben allein in den Investitionen und Prozessen.

Aber genau diese könnten das frühe Ende der Kernenergie bedeuten, glaubt Ulf Bossel vom European Fuel Cell Forum. Mit zunehmender Ausbeutung der Uran-Lagerstätten und immer geringerer Erzqualität steige der Energieaufwand für die Gewinnung und Anreicherung des Kernbrennstoffs. Schon in wenigen Jahrzehnten könne die Energiebilanz von Kernkraftwerken dadurch negativ werden – der Energieaufwand für die Gewinnung des Brennstoffs übersteige dann die Energieerzeugung des Kraftwerks. Tatsächlich schwankt der Anteil des spaltbaren Uran-235 im Erz von über 20 bis unter 0,1 Prozent. Bei noch geringeren Konzentrationen werde die Ausbeutung zum ökologischen Nullsummenspiel, glaubt Bossel. Diese Grenze könne schon 2030 erreicht sein.

Für Alfred Voß sind das jedoch voreilige Schlüsse. Wie vor 50 Jahren beim Öl gelte für Uran: Die meisten Vorkommen seien heute noch gar nicht bekannt. Allerdings geht auch Voß davon aus, dass der Gehalt an spaltbarem Uran im Erz langfristig sinkt. Sein Institut hat errechnet, was dies für den CO_2-Ausstoß von Kernkraftwerken bedeuten würde. Heute – bei einer durchschnittlichen Uran-235-Konzentration von 0,15 Prozent – ist der Beitrag der Gewinnung und Aufbereitung mit zwei Gramm pro Kilowattstunde verglichen mit den rund zehn Gramm für die übrigen Prozesse gering. Bei einer Konzentration von nur noch 0,01 Prozent stiege der Ausstoß allerdings auf 25 Gramm pro Kilowattstunde, insgesamt also auf mindestens 35 Gramm. Für Voß ist dieser Wert immer noch gering, wenn man die Bilanz mit anderen, insbesondere fossilen Energieträgern vergleicht.

Die große Unbekannte in der Kernenergie-Debatte ist immer noch die Entsorgung des Atommülls. Alle diskutierten Varianten würden allerdings nur etwa sieben bis acht Prozent zur Gesamtemissionen beisteuern. Für die CO_2-Bilanz spielt dieser Posten also keine dominierende Rolle.

Bernd Müller

Der Autor ist freier Journalist in Esslingen.

häufigste Protein auf der Erde überhaupt ist, trägt es in den Bakterien des Trophosoms nur etwa ein Prozent zur gesamten Eiweißmenge bei.

Mit so wenig Rubisco kann der Calvin-Zyklus nicht der einzige Weg zum Aufbau von Biomolekülen sein. Aber wie sonst sollen die Bakterien Kohlendioxid in Zucker und Aminosäuren verwandeln? Eine mögliche Antwort liefert der Fund des kompletten Enzymbaukastens für einen weiteren bekannten Stoffwechselweg im Eiweißsortiment der Mikroben. Es handelt sich um den Zitronensäurezyklus, nach seinem Entdecker auch Krebszyklus genannt. Bei höheren Lebewesen – von Hefen bis zum Menschen – dient er zur Energiegewinnung durch den Abbau von Kohlenstoffverbindungen.

Allerdings läßt sich der Kreislauf bei geeigneten Konzentrationsverhältnissen auch rückwärts fahren und damit zum Aufbau von Biomolekülen verwenden. Ein solcher inverser Krebszyklus würde sogar weniger Energie verbrauchen als der Calvin-Zyklus. Für seine Beteiligung spricht auch das ungewöhnliche Mengenverhältnis der stabilen Kohlenstoff-Isotope in den Bakterien, das von dem in Pflanzen abweicht. Mit einem inversen Krebszyklus ließe es sich erklären.

Aber warum leisten sich die Bakterien zwei Stoffwechselwege zum Aufbau von Biomolekülen, wo doch einer genügen würde? Vielleicht können sie – so Schweder und seine Mitarbeiter – auf diese Weise ihren Stoffwechsel an verschiedene Umweltbedingungen anpassen. Steht viel Schwefel als Brennstoff zur Verfügung, bevorzugen sie den effizienteren, aber mehr Energie kostenden Calvin-Zyklus. In Notzeiten hingegen greifen sie verstärkt auf den inversen Krebszyklus zurück. Erste Experimente, bei denen die Forscher die Mengenverhältnisse der Enzyme in schwefelreichen und schwefelarmen Trophosomen verglichen, scheinen diese Hypothese zu bestätigen.

Natürlich ist auch mit der neuen Untersuchung die ausgefallene Lebensweise der Röhrenwürmer und ihrer Bakterien noch nicht restlos aufgeklärt. Das Ergebnis ermutigt jedoch zu weiteren Forschungen. Schließlich zeigt es, dass sich die Beschäftigung mit ungewöhnlichen ökologischen Nischen lohnt, weil sie auch ungewöhnliche Resultate bringt.

Michael Groß ist promovierter Biochemiker und Wissenschaftsjournalist in Oxford (England).

Springers Einwürfe

War jemals jemand auf dem Mond?

Manche Menschheitsabenteuer geraten allzu rasch in Vergessenheit.

Kürzlich sass ich mit Bekannten im »Weinstein« beisammen, einem gemütlichen Lokal in der Heidelberger Weststadt, und zu später Stunde kam die Sprache, ich weiß nicht mehr wie, auf Abenteuer im Weltraum. Meine weinselige Behauptung, auf dem Mond seien im Lauf der Jahre gut zehn Amerikaner umherspaziert, stieß auf einhelligen Widerspruch. Man erinnerte sich vage an einen Stiefelabdruck im Mondstaub und den Spruch »Ein kleiner Schritt für einen Menschen, ein Riesensprung für die Menschheit«. Doch sogar diesen ersten Mondspaziergang zogen mehrere in Zweifel: Er sei in einem irdischen Filmstudio gedreht worden; das könne jeder im Internet nachlesen.

Die Debatte erfasste rasch die Nebentische und geriet zu einer nicht repräsentativen Umfrage: Wie viele Mondfahrten fanden wirklich statt? Die gemittelten Antworten ergaben einen Wert um 0,5; denn dem Lager der Skeptiker – alles Schwindel – stand ein etwa gleich großer Pulk gegenüber, der immerhin eine einzige bemannte Mondlandung für wahrscheinlich hielt. Meine Aussage – rund zehn – blieb ein einsamer statistischer Ausreißer. Da der Wirt nur ein Lexikon aus den frühen 1960er Jahren zur Hand hatte, vertagte man sich auf einen späteren Umtrunk.

Es ist eine seltsame Erfahrung, mit einer Sache, die man für unbezweifelbar hält, einen ganzen Kneipenabend lang hoffnungslos in der Minderheit zu bleiben. Mit jedem Schluck Wein erschien mir mein vermeintliches Wissen immer weniger sicher. Tatsächlich stellte sich am nächsten Tag heraus, dass ich nur ungefähr im Recht gewesen war; es hat sechs erfolgreiche Mondlandungen mit je zwei Spaziergängern gegeben.

Zum einen führte mir die Weinstein-Debatte vor Augen, wie rasch noch so spektakuläre Unternehmungen, wenn sie mehrmals wiederholt werden, aus der öffentlichen Aufmerksamkeit verschwinden. Wen kümmert heutzutage schon, wie viele Menschen auf den Mount Everest geklettert sind? Die amerikanischen Apollo-Missionen liefen außerdem mit der Zeit ins Leere, weil ihr wissenschaftlicher Ertrag praktisch nur im wiederholten, ungeheuer aufwändigen Einsammeln von einer Menge Mondgestein bestand.

Vor allem: Der große Rivale nahm am Wettlauf gar nicht teil. Damals gab die Sowjetunion vor, ihr genügten Mondmissionen mit Robotersonden; heute weiß man, dass ihre eigens für bemannte Mondflüge entwickelten Riesenraketen mehrmals am Boden explodierten. Nicht zuletzt mangels Gegner wurde die Serie der Apollo-Missionen vorzeitig abgebrochen; schon die letzten Mondflüge fanden praktisch unter Ausschluss der Weltöffentlichkeit statt.

Interessant finde ich aber auch, welch zwiespältige Rolle das Internet als Hort und Quelle historischen Bewusstseins übernommen hat. Beim Stichwort Mondflüge stößt man im Netz alsbald auf Pro und Kontra zu der Frage, ob die erste Mondlandung echt oder simuliert war. Angeblich flattert auf den Aufnahmen die US-Flagge im Wind, der Himmel erscheint sternenlos und die Objekte werfen widersprüchliche Schatten. Durch diese Verschwörungstheorie entsteht offenbar bei vielen Netzsurfern implizit der Eindruck, es habe, wenn überhaupt, nur diese eine Mission gegeben, denn vom Vorspiegeln einer ganzen Serie von Mondspaziergängen ist nirgends die Rede.

Michael Springer

Die genannten Zahlen über die tatsächlich durchgeführten Apollo-Missionen entnahm ich übrigens am nächsten Tag dem Online-Lexikon Wikipedia. Nicht ausgeschlossen, dass mir nun ein Skeptiker beim nächsten Kneipengespräch entgegnen wird: »Du glaubst wohl alles, was dort steht?« Dann würde der Streit über Männer im Mond in die nächste Runde gehen.

Intelligenztests für Kolkraben

Wie klug sind Raben? Manche Aufgaben scheint *Corvus corax* rein durch Nachdenken zu lösen. Gegenüber Artgenossen oder anderen »Kumpanen« beweisen die Vögel auch psychisches Verständnis.

Von Bernd Heinrich
und Thomas Bugnyar

Plötzlich rollt einer der Raben auf den Rücken und streckt die Beine in die Luft – direkt neben dem toten Biber, an dem er und ein paar Artgenossen gerade fraßen. Der Trapper, der in einem Waldgebiet Nordamerikas Zeuge dieses Vorfalls wird, ist überzeugt, dass sich der Vogel absichtlich todkrank stellt, damit seine Genossen den Kadaver für vergiftet halten und er ihn allein fressen kann.

Anekdoten dieser Art existieren viele. So sieht sich ein Ornithologe einem Steinhagel ausgesetzt, als er junge Raben in einem Nest hoch an einer Felswand beringen möchte. Die über ihm zeternden Elternvögel, glaubt er, bombardieren ihn mit Steinen.

Ein weiteres Beispiel aus der amerikanischen Wildnis: Als sich ein Wanderer bei einer einsamen Berghütte ausruht, hört er einen Kolkraben in der Nähe wiederholt laut krächzen. Der Mann schaut in diese Richtung – und sieht im Dickicht, gerade noch rechtzeitig, einen Puma, der schon zum Sprung auf ihn ansetzt. Für ihn ist ganz klar: Der Vogel wollte ihn vor dem Berglöwen warnen.

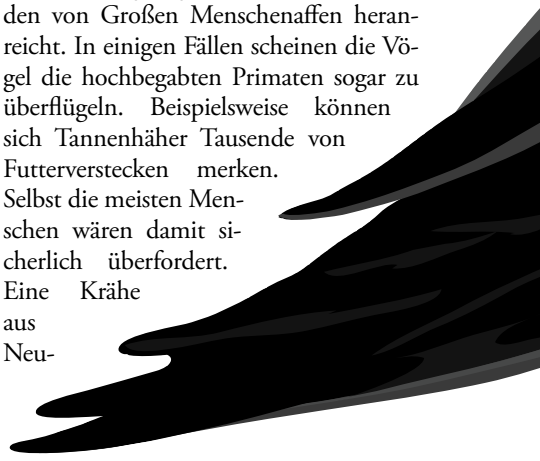
Ganz lassen sich solcherart Erklärungen zwar nicht von der Hand weisen. In den meisten Fällen halten es Kolkrabenexperten allerdings für wahrscheinlicher, dass das auffällige Verhalten andere Gründe hat. Raben sind verspielt wie kaum eine andere Vogelart. Sie rollen sich gern einmal auf den Rücken, anscheinend einfach zum Spaß. Sie pflegen heftig auf Substrat herumzuhacken, wenn ihr Nest bedroht erscheint. Bekannt ist den Verhaltensforschern auch, dass sie manchmal größere Raubtiere zu Beute führen, die sie selbst nicht überwältigen können, von der sie dann aber auch fressen. Vielleicht wollte der Rabe den Puma ja auf den Wanderer hetzen.

Manches Verhalten von Kolkraben wirkt tatsächlich recht gescheit. Ausgelegte Talkblöcke zerteilen sie in transportable Brocken. Zwiebacke stapeln sie so, dass sie mit dem gesamten Packen wegfliegen können. Futterneider legen sie mit vorgetäuschten Verstecken herein. Solches scheinbar findige Gebaren beweist trotzdem nicht zwangsläufig, dass die Vögel einsichtig handeln, sich Handlungsalternativen vorstellen und die günstigste Option wählen.

Durch reine Beobachtung können Forscher letztlich nicht ermessen, ob derartiges Verhalten wirklich vernunftgeleitet ist, also auf logischem Schlussfolgern beruht. Vieles, was Tiere tun, wirkt auf den ersten Blick klug überlegt, und doch entpuppt es sich als instinktiv oder als mechanisch angelernt. Für Kolkraben gab es bis etwa 1990 wohl nur eine in dieser Hinsicht saubere Verhaltensstudie über ihre Denkleistungen. Im Jahr 1943 beschrieb der damals an der Universität Königsberg lehrende deutsche Zoologe Otto Koehler (1889–1974), dass sein zehn Jahre alter, zahmer Rabe Jakob bis sieben zählen konnte. Der Vogel lernte an Punkten auf den Deckeln zu erkennen, unter welchem von mehreren Gefäßen Futter versteckt war.

Doch erst jüngere Studien haben klar bewiesen, dass Kolkraben logisch denken können und manche Probleme intelligent lösen. Die meisten dieser Arbeiten haben wir selbst durchgeführt. Besonders erstaunt hat uns, dass die Vögel nicht nur zwischen Individuen unterscheiden, sondern auch einbeziehen, was diese Individuen wissen. Sieht man einmal von den sozialen Insekten ab, deren Staaten anders funktionieren, ist solches Wissen und Können eine wichtige Voraussetzung für soziale Gemeinschaften.

Nun gelten allgemein unter den Vögeln nicht nur Kolkraben als schlau. Allein bei anderen Rabenvögeln – Hähern, Elstern, Krähen – haben Verhaltensforscher gerade in den letzten zwanzig Jahren einige unerwartete Leistungen entdeckt, die auf den ersten Blick hochintelligent wirken. Leicht ist man versucht zu meinen, dass manche dieser Fähigkeiten einen Intelligenzgrad erfordern, der an den von Großen Menschenaffen heranreicht. In einigen Fällen scheinen die Vögel die hochbegabten Primaten sogar zu überflügeln. Beispielsweise können sich Tannenhäher Tausende von Futterverstecken merken. Selbst die meisten Menschen wären damit sicherlich überfordert. Eine Krähe aus Neukaledonien versteht sich darauf, die langen Blätter des Schraubenbaums so zu zerschlitzen, dass die harte Mittelspreite einen Spieß oder Haken ergibt, mit dem sich Maden und dergleichen aus Holzspalten herauspulen lassen.



Die Frage ist nur, inwieweit in diesen Fällen tatsächlich Intelligenz im Spiel ist. ▷

ALLE ILLUSTRATIONEN DES ARTIKELS: JEN CHRISTIANSEN

Kolkraben gehören sicherlich zu den klügsten Rabenvögeln, vielleicht zu den schlausten Vögeln überhaupt. Dank ihrer Intelligenz konnten sie eine Vielfalt von Lebensräumen besiedeln.

▷ Auch wenn solches Verhalten auf uns klug wirkt: Wie viel daran beruht auf angeborenen »blinden« Programmen, wie viel auf stupidem Lernen durch häufigen Versuch und Irrtum, und wie viel fußt wirklich auf einer Verstandestätigkeit, bei der das Tier zwischen mehreren Optionen abwägt? Selbst bei Kolkraben ist das oft schwer zu erkennen. Darum ersannen wir für Raben verschiedene Versuche, bei denen diese drei Ebenen unterschieden werden konnten. So hofften wir zu ergründen, in welchem Maß bei einem intelligent wirkenden Verhalten tatsächlich Überlegung und Verständnis mit hineinspielen.

In der ersten Art von Tests konfrontierten wir die Vögel einzeln mit einem Fleischstückchen, das an einer langen Schnur von einer Sitzstange hing. Die Situation kannten unsere Tiere nicht – sicherlich war sie auch für die Wildfänge unter ihnen neu. Die Anordnung war so gewählt, dass der Rabe das Futter nicht direkt erreichen konnte, sondern es irgendwie an dem Faden zu sich hochziehen musste. Das ging allerdings nur, wenn er sich von der Sitzstange tief hinabreckte, den Faden ein Stück weit fasste, dieses Stück einholte und oben gut mit den Füßen festhielt – und die Prozedur mehrere Male wiederholte (siehe Bild rechts).

Das brachte nicht jeder der Testvögel zu Stande, und von den erfolgreichen auch nicht alle auf Anhieb. Doch zumindest manche der erwachsenen Raben – das heißt im Alter von mindestens zwei Jahren – meisterten die Aufgabe rasch, ohne vorher überhaupt herumzuprobieren. Diese Vögel sahen sich die Sache augenscheinlich ein paar Minuten lang nur an. Dann traten sie in Aktion, und die schnellsten benötigten schon beim ersten Mal kaum dreißig Sekunden, bis sie den Leckerbissen erhascht hatten, die meisten anderen erwachsenen Raben wenige Minuten.

Ganz junge, erst seit ein oder zwei Monaten flügge Tiere versagten bei dieser Aufgabe völlig. Einjährige wurden in der Regel damit fertig, doch sie probierten zunächst alles mögliche andere aus. Sie flogen zum Beispiel den Futterbrocken an, oder sie hackten auf die Schnur ein, zerrten an ihr, verdrehten sie und dergleichen. Bis sie den Brocken schließlich zu sich hochgezogen hatten, benötigten sie durchschnittlich sechs Minuten.

Können Raben nachdenken?

Dass unsere schnell erfolgreichen Versuchstiere den komplexen Ablauf vorher irgendwie hatten trainieren können, durften wir ausschließen. Bei einem klassischen Verhaltenstraining lernen Labortiere längere Abläufe, indem jeder einzelne zum Ziel führende Schritt wiederholt mit Futter belohnt wird. Falsches Verhalten wird in der Regel mit leichten Elektroschocks bestraft. Vermutlich muss das Tier hierbei den Zusammenhang der Einzelschritte überhaupt nicht verstehen. Unsere Raben erhielten aber zwischendurch keine Leckerbissen. Man mag nun einwenden, dass es schon bestärkend wirkt, wenn der Fleischbrocken näher rückt, während der Vogel an dem Faden zerrt. Allerdings dauert Lernen durch Versuch und Irrtum nach aller Erfahrung lange und erfordert vielfache Wiederholung. Solch eine Sequenz hätten wir mit den Vögeln vermutlich monatelang trainieren müssen. Doch selbst die einjährigen Raben, die anfangs noch etwas herumprobierten, benötigten bis zur Lösung der Aufgabe nur wenige Minuten. Die besten Vögel verhielten sich von vornherein so, als wüssten sie, was sie da machen. Die naheliegendste und auch einfachste Erklärung dürfte also sein, dass sich diese Kolkraben Lösungsmöglichkeiten tatsächlich vorstellten und überlegten, wie sie die Sache am geschicktesten angehen konnten.

Ob das zutraf, konnten wir testen. Falls die Raben wirklich wussten, was sie taten, mussten sie sich anschließend auch entsprechend verhalten. War ihnen zum Beispiel nach erfolgreichem Einholen der »Beute« klar, dass das Fleisch an einem Faden festgebunden war? Sobald der Vogel sein Ziel erreicht hatte, scheuchten wir ihn auf. Würde er den Brocken nun loslassen oder nicht? Tatsächlich ließen die meisten unserer Raben dieser neuen Versuchsserie den Leckerbissen fahren. Nur wenige hielten ihn beim Abfliegen fest – sodass er ihnen heftig aus dem Schnabel gerissen wurde. Wir machten auch den Gegentest und boten den Vögeln Fleischbrocken an einem Faden, der aber nur lose auf der Sitzstange lag. In diesem Fall flogen die Vögel immer mit dem Fleisch davon.

Als Prüfung, ob unsere Kolkraben bei den Fadentests wirklich nachgedacht hatten, entwarfen wir schließlich noch einen etwas verzwickteren Versuchsaufbau und konfrontierten damit neue – sozusagen naive – Vögel (Bild auf S. 28). Wir konstruierten eine Anordnung, die, so hofften wir, für die Vögel unlogisch und somit widersinnig war – weil sie dessen Raffinesse nicht verstanden. Trotzdem müssten sie diesen Test bestehen können, wenn sie bei Aufgaben dieser Art keine Logik einsetzen, sondern die Lösung allmählich durch Versuch und Irrtum finden.

Wiederum hing ein Fleischstück an einem langen Faden – allerdings war der Faden diesmal über eine hoch liegende Schiene geführt. Wie im ersten Test konnten die Raben den Bissen nur erlangen, indem sie die Schnur Stück um Stück einholten. Auf Höhe der Stange konnten sie das Fleisch dann leicht mit dem Schnabel durch das Gitter fassen und zu sich holen. Nur mussten sie den Faden diesmal eben nach unten ziehen, dem Fleischstück praktisch entgegen – also sozusagen in der logisch gesehen vermeintlich falschen Richtung. Falls zumindest einige der Vögel die erste Aufgabe durch reines Herumprobieren bewältigt hatten, müssten manche der neuen Raben auch diese Situation schließlich meistern können. Denn abgesehen von der Zugrichtung waren, rein mechanisch

In Kürze

- Der **Intelligenz von Kolkraben**, *Corvus corax*, kommen Verhaltensforscher mit ausgeklügelten Verhaltensexperimenten auf die Schliche. Diese großen Singvögel scheinen manche Zusammenhänge tatsächlich **logisch erfassen** zu können – sie lösen Situationen mitunter auf Anhieb ohne vorheriges Probieren.
- Die Raben können registrieren und später **berücksichtigen**, wer sie in bestimmten wichtigen Situationen beobachtet (ob Vogel oder Mensch), so beim **Futterverstecken**. Offenbar ahnen sie manche Reaktionen der anderen voraus und greifen ihnen vor.

gesehen, im Grunde die gleichen Verhaltensschritte erforderlich wie im ersten Experiment.

Doch diesmal fand kein einziges Tier den Trick heraus. Man sah deutlich, dass die Raben den Futterbrocken gern gehabt hätten. Sie überprüften auch alles gründlich und pickten und zerrten am Faden. Zeitweilig kam das Futter dadurch etwas näher heran. Trotzdem gaben alle Vögel bald auf. Keiner lernte es, das Fleisch hochzuziehen.

Hieraus schließen wir: Den ersten Test bewältigten die Raben deswegen, weil sie ihren Verstand gebrauchten. Manche kamen dadurch mit der Situation sofort zu Rande, andere immerhin nach einigem Hin und Her. Bei dem offenbar für sie nicht durchschaubaren Umwegversuch war ihr logisches Vermögen anscheinend überfordert – und prompt versagten sie völlig. Somit ist zu vermuten, dass Kolkraben Handlungen innerlich prüfen und durchprobieren – dass sie sich das Handlungsergebnis vorstellen können.

Zu viel Verstand erzeugt allzu leicht Chaos

Dass diese geistige Kapazität den meisten Tieren wohl fehlt oder höchstens in Spuren existiert, erscheint anpassungsgeschichtlich durchaus sinnvoll. Über viele Generationen bewährtes genetisch programmiertes Verhalten genügt oft hohen Anforderungen. Wie auch immer artspezifische Verhaltensmuster jeweils entstanden sein mögen – eines der großen Rätsel der Biologie: Selbst Insekten mit ihren winzigen Gehirnen bringen dadurch Erstaunliches zu Wege. Bei einer Wespenart beherrschen schon frisch geschlüpfte Tiere perfekt die Kunst, Papier herzustellen und daraus ein einwandfreies, für die Art typisches Wabennest zu konstruieren. Eine andere Art baut aus Schlamm ein Mörtelnest von ganz anderer Form.

Auch den Vögeln ist angeboren, wie sie nisten und was für ein Nest sie haben. Rauchschwalben formen mit Schlamm eine Schale, die beim Trocknen härtet. Fahlstirnschwalben, die in Südafrika leben, konstruieren aus nasser Erde Kugelnester mit einem kleinen, runden Einflugsloch. Keine der dazu erforderlichen, teils nicht einfachen Verhaltensmuster erlernt der Vogel. Er braucht dabei auch nicht zu denken. Allerdings dürften Erfahrung und Mitdenken manches angeborene Verhalten glätten und erleichtern. Von vornherein den Verstand einzusetzen ist viel unzuverlässiger. Lösungen auf diesem Weg zu finden birgt bekanntlich stets die Gefahr des Chaos. Warum sind manche Lebewesen, wie der Mensch, dann überhaupt dazu verurteilt, beim Handeln Denken und Logik zu gebrauchen? Warum müssen einige wenige Arten herumprobieren und erst viele Fehler machen, bis die Sache vielleicht endlich funktioniert?

Gewöhnlich antworten Forscher, diese Arten seien in einer komplexen, wechselhaften Umwelt evolviert, in der sie mit starrem Verhalten nicht zurechtgekommen wären. Das gilt auch und gerade für das soziale Umfeld. Sofern das einzelne Tier seine nächsten Artgenossen im sozialen Kontext individuell einschätzen kann und entsprechend differenziert behandelt – und umgekehrt auch die anderen dieses Tier als etwas Eigenes, Gesondertes zu unterscheiden pflegen –, leben die Angehörigen dieser Art fraglos in einer komplexen Umwelt. Darum heißt es oft, die Triebkraft für Intelligenzevolution sei vielfach in einem individuell geprägten Sozialleben zu suchen. In einem derartigen Umfeld ist es besonders wertvoll, wenn der Einzelne mögliche Handlungen und Reaktionen der anderen vorherzusagen vermag. Denn die wichtigste Umweltkomponente für ein Tier in solcher Situation stellen diese anderen dar.

Diese Überlegungen veranlassten uns, für die Kolkraben weitere Tests zu entwerfen, bei denen wir speziell den jeweiligen sozialen Kontext beachteten. Vielleicht würden wir danach besser verstehen, warum diese Vögel zu den klügsten Tieren gehören. Wir konnten die Fragestellung sogar noch auf die Begegnung mit anderen Arten ausweiten. Das berührt vor allem die Nahrungsbeschaffung. Kolkraben erjagen zwar auch selbst manchmal Tiere, doch vor allem machen sie sich an Kadaver heran, die andere Tiere erlegt haben. Da heißt es fix sein, denn meist verschlingen die Wölfe oder sonstigen Räuber ihre Beute rasch. Ein erlegter Hirsch etwa verschwindet in höchstens zwei Tagen. Will ein Rabe daran teilhaben, ist er am besten sofort zur Stelle, während der oder die Jäger selbst noch fressen, und holt sich gleich ein paar Brocken.

Natürlich lassen sich Beutebesitzer das nicht gefallen. Der Vogel muss genau wissen, wie viel er wagen darf, sonst kann es ihn sogar das Leben kosten. Mit allzu starrem angeborenem Verhalten wäre er wohl in manchen Situationen verloren, ebenso, wenn er beim Klauen erst noch lernen müsste, urplötzliche Reaktionen des Raubtiers abzuschätzen. Vielmehr zahlt es sich unbedingt aus, mögliche Angriffe des Raubtiers einkalkulieren zu können, blitzschnell und flexibel darauf zu reagieren und sich vielleicht sogar auf Ablenkungsmanöver zu verstehen.

Ebenso verlangt die Futterkonkurrenz der Artgenossen untereinander ein rasches Einschätzen immer wieder neuer Situationen. Erwachsene Raben leben paarweise in Territorien. Fällt dort eine ergiebige Futterquelle an, dann verteidigt das Paar diese gegen Außenstehende. Unverpaarte und jüngere Kolkraben dagegen bilden Trupps, so genannte Junggesellenverbände. Findet ein Vogel aus der Schar eine gute Beute, holt er, wenn nötig, seine Kumpane mit dazu. Eine größere Schar kann vom ansässigen Paar nicht so leicht vertrieben werden. Dieser Erfolg ist aber in mehrerer Hinsicht zweischneidig: Gemeinsam sind die Vögel auch gegen die Raubtiere stärker, doch sie machen sich nun gegenseitig Konkurrenz. ▷

Den Leckerbissen kann der Rabe nur ergattern, wenn er die Schnur Stück um Stück einholt. Einige erwachsene Raben erdachten in wenigen Minuten reinen Schauens gleich den richtigen Lösungsweg. Sie bewältigten die Aufgabe dann auf Anhieb – offenbar dank logischen Denkens.

▷ Manches, was für all solche Fälle wichtig sein kann, lernen Kolkraben offensichtlich in ihrer Jugend, lange vor dem Ernstfall, in vergleichsweise sicheren Situationen. Ohne dass es ums Fressen geht, landen sie dicht hinter einem Wolf oder einem anderen großen Raubtier und zwicken das Tier schnell, als würden sie austesten, wie der Gepiesackte reagiert. Wahrscheinlich will der junge Vogel gar nicht absichtlich »üben«. Eher dürfte es sich um vorwitziges, spielerisches Verhalten handeln, das sonst keinen unmittelbaren Zweck hat – außer den Spaß daran, die Reaktion zu erleben.

Bereits ganz junge Raben erkennen, dass es gefährlich ist, einen Wolf in den Schwanz zu zwacken. Das sieht man ihnen deutlich an. Doch obwohl sie offenbar Angst haben, scheinen sie geradezu getrieben, den Wolf zu provozieren. Die jungen Kolkraben lernen bei solchen »Mutproben« wahrscheinlich, wie nah sie den verschiedenen Raubtieren kommen dürfen und wann sie sicher sind. Umgekehrt gewöhnen sich diese Raubtiere aber auch an die ständige Gegenwart der Raben – ein günstiger Nebeneffekt.

Um sich mit Futter zu versorgen, braucht es allerdings noch mehr gewiefte Tricks. Unter den geschilderten Umständen gilt es, möglichst schnell möglichst viel Fleisch zu ergattern und das Erhaschte vor anderen Hungrigen zu schützen, also vor allem vor gierigen Artgenossen. Fressen kann man später. Wie andere Rabenvögel auch pflegen Kolkraben Nahrung zu verstecken. Mit jedem Fleischstück, das sie von dem umkämpften Kadaver abgerissen haben, machen sie sich gleich davon und graben es an verborgener Stelle ein oder decken es heimlich mit irgendwelchen Dingen komplett zu. Ihre Verstecke, oft recht viele, behalten sie genau im Gedächtnis. In den nächsten Stunden und Tagen suchen sie meist alle wieder auf und leeren sie.

Hier muss der Rabe die Schnur von oben herunterziehen. Von vornherein, ohne die Erfahrung des ersten Versuchs, kamen die Vögel nicht auf die richtige Idee. Vermutlich hielten sie das Arragement für unlogisch. (Das Gitter verhinderte, dass sie die Schnur doch direkt heraufzogen.)

Heimlichtun spielend lernen

Aber im Gegensatz zu vielen anderen Vögeln, die Futterverstecke anlegen, beobachten und behalten Kolkraben auch akribisch, wo jemand anders Futter verbirgt. Sie selbst warten, wenn es irgend geht, mit dem Verstecken, bis niemand hinschaut. Auch suchen sie sich nach Möglichkeit sichtgeschützte Stellen hinter Bäumen oder Steinen. Später achten sie scharf darauf, dass ja keiner in die Nähe dieser Orte kommt. Andererseits rauben sie gern die Futterverstecke anderer Raben aus. Dies alles erfordert ebenfalls hohe Flexibilität im Verhalten.

Uns schien das Futterverbergen ein geeigneter Ansatz, um herauszufinden, ob spielerisches Verhalten tatsächlich solche Fähigkeiten schult. Wenn die Vögel als Jungtiere im Spiel erfahren, wie sie mit großen Raubtieren umgehen müssen – lernen sie auf ähnliche Weise vielleicht auch schon in der Jugend, wie es funktioniert, Dinge unter Einschätzung der Situation erfolgreich zu verstecken und zu bewachen? Wir wählten für diese Studien eine große Voliere, die mit Bäumen und vielerlei anderen Pflanzen eine abwechslungsreiche, recht naturnahe Szenerie bot. Früher schon hatten wir in diesem Gehege an erwachsenen Raben gut beobachten können, wie findig sie ihre Verstecke anlegten und hüteten.

Was aber würden junge Kolkraben machen? Unsere Vermutung fanden wir bald bestätigt: Den Anfang vom umsichtigen Verstecken machen tatsächlich allerlei Lernerfahrungen, provoziert durch offensichtlich im Kern angeborene spielerische Verhaltensaktionen und -reaktionen. Das beginnt unter natürlichen Bedingungen damit, dass die eben flügge gewordene Geschwisterschar, wenn sie ihren Eltern auf Streifzügen folgt, bald lernt, was von den Dingen alles essbar ist, die man so findet. Schnell erkennen die Vögel etwa Früchte oder Insekten.

Bereits im Nest nehmen sie alles nur Erdenkliche in den Schnabel und probieren damit offenbar spielerisch herum. In den ersten Tagen nach dem Ausfliegen erkunden sie solcherart eifrig alles nur mögliche »Spielzeug«. Handaufgezogene Raben benehmen sich genauso – auch eine Geschwistergruppe, die einer von uns täglich in der Voliere ausführte. Am Anfang pickten unsere Vögel alles auf, was sich irgendwie dazu anbot: kleine Zweige, Blätter, Blumen, Kiefernzapfen, Steinchen, Zigarettenkippen, Geldstücke oder was immer wir verstreut hatten. Doch schon nach wenigen Tagen kümmerten sie sich um nicht Essbares kaum noch. Auf Fressbares stürzten sie sich dagegen begierig. In diesem Alter werden sie normalerweise noch von den Eltern gefüttert. Es sieht demnach so aus, als ob sie mit ihrer Umwelt noch spielen und dabei wie nebenher für spätere Zeiten brauchbare Kenntnisse über Nahrung erwerben.

Gleichzeitig werden sie im Verstecken von Objekten besser. Anfangs legen sie nur wahllos manche sie interessierenden Sachen – ob essbar oder nicht – irgendwo hinein oder stecken sie hinter etwas anderes. Später stopfen sie Objekte immerhin so tief in Spalten, dass sie zumindest teilweise verdeckt sind. Nach ein bis zwei Monaten beginnen die jungen Raben bereits, etwas mit Pflanzenresten zuzudecken. Auch in diesem Alter werden sie immer noch von den Eltern versorgt. Dadurch geschieht dies alles in deren und der Geschwister Gegenwart. Recht oft holt ein anderer Jungvogel das Versteckte denn auch prompt wieder hervor. Lernen die jungen Raben durch solche Vorfälle, worauf es beim Futterverstecken ankommt – selbst wenn sie mit nicht Essbarem hantieren? Merken sie, dass sie aufpassen müssen, dabei nicht gesehen zu werden? Und auch, dass man ein Ver-

MINDEN PICTURES, JIM BRANDENBURG

Gerade haben Wölfe im Yellowstone-Nationalpark dieses Tier gerissen, da macht eine Rabenschar ihnen einen Teil der Beute streitig. Kolkraben sind die größten Raben- und Singvögel. Sie werden etwa 65 Zentimeter lang, wiegen an die 1,3 Kilogramm und erreichen eine Flügelspanne von fast 1,3 Metern.

steck behüten muss? Allgemeiner gesagt: Begreifen sie, dass es ihnen hilft, Verhalten anderer vorherzusehen, das ihren eigenen Interessen entgegenstünde?

Wissenschaftlich zu belegen, ob sich Erfahrungen im frühen Leben auf das spätere Verhalten auswirken, ist stets schwierig. Solche Einflüsse sind experimentell schwer zu kontrollieren. Nun wussten wir aber, dass die Raben auch uns, ihre menschlichen Kumpane, beachteten, wenn wir Futter versteckten. Jene Stellen plünderten sie gern. Unser eigenes Verhalten konnten wir kontrollieren. So bestimmten wir eine Person als »Dieb«: Jedes Mal, wenn ein Jungvogel ein – ungenießbares – Objekt spielerisch »versteckt« hatte, musste derjenige es »stehlen«. Eine andere Person gab sich stets naiv: Dieser Mitarbeiter schaute sich alle Verstecke an und untersuchte sie, nahm aber nie etwas weg.

Diebische Erfahrungen

Der eigentliche Test folgte, als diese Vögel etwas älter geworden waren und sich schon selbst um ihr Futter kümmerten. Jetzt boten wir ihnen Nahrungsbrocken, während sich jeweils einer der beiden Leute in der Voliere aufhielt. Allerdings tat die Person diesmal nichts anderes, als den Raben zuzusehen.

War der »Dieb« zugegen, verstrich eindeutig mehr Zeit, bis die Tiere Futter verbargen. Wir hatten den Eindruck, sie versuchten einen Moment abzupassen, in dem er gerade nicht guckte. Sie pflegten auch ein Versteck gleich wieder zu leeren, wenn die Person zum Raben hinging, während er das Futter verbarg. Beim naiven Mitarbeiter versteckten die Vögel das Fressen gleich. Sie kümmerten sich nicht darum, ob derjenige davon Zeuge wurde. Diese Ergebnisse zeigen unseres Erachtens zweierlei: Offenbar werden junge Vögel geschickter, wenn sie erleben, dass ein anderer ihre Verstecke plündert. Außerdem war für uns aufschlussreich zu erfahren, dass Raben hierbei zwischen Individuen Unterschiede machen.

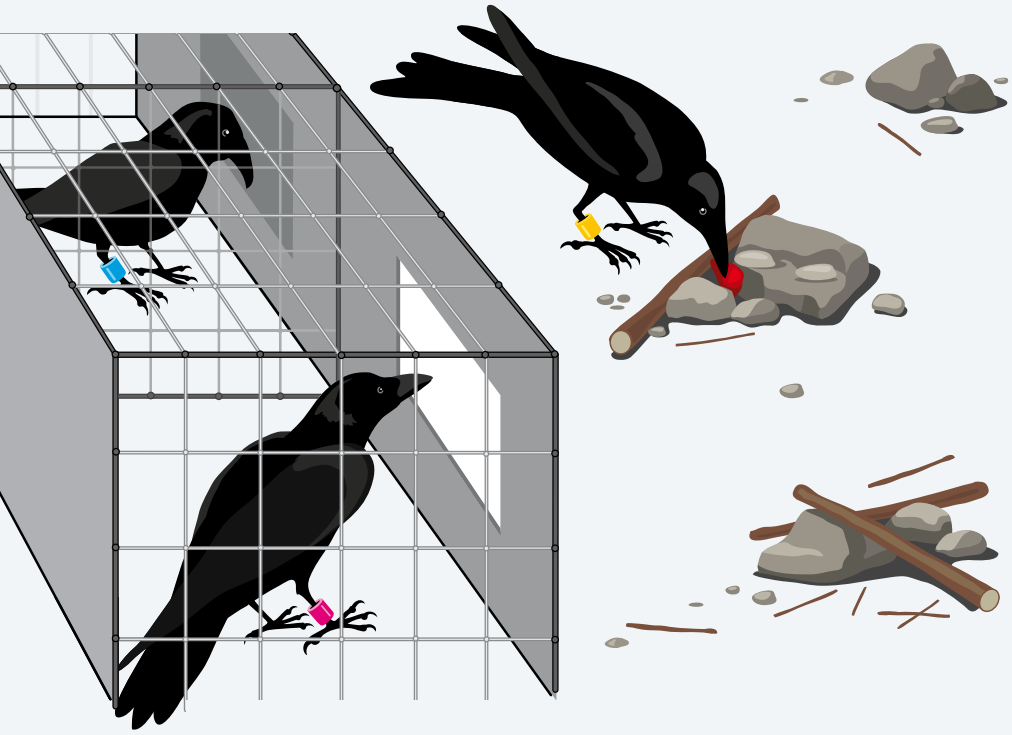
Im Freiland ist an guten Futterquellen oft der ganze Schwarm zugegen. Dann sind die einzelnen Raben meist hauptsächlich damit beschäftigt, möglichst viele Fleischstücke vor den anderen zu retten. Sie legen oft Dutzende von Verstecken an, und es wäre dem einzelnen Vogel in dem Trubel völlig unmöglich, jeden potenziellen Konkurrenten fortzujagen, der irgend in die Nähe von einem dieser geheimen Winkel kommt. Allerdings verringern die Raben in der Natur die Gefahr, beim Verstecken beobachtet oder der Beute beraubt zu werden. Sie verteilen nämlich ihre besten Vorräte über ein Gelände von etlichen Quadratkilometern.

Was tun die Vögel aber in einer Voliere, wo sie dem scheelen Blick von Konkurrenten oft nicht recht ausweichen können? Machen sie bei ihresgleichen Unterschiede – ob derjenige ihnen beim Einbuddeln zusah oder nicht? Schließlich, so viel wussten wir bereits, erkennen sie ihre Artgenossen individuell, wie sie ja sogar einzelne Menschen voneinander zu unterscheiden wissen. Die Frage war nun, ob sie den einzelnen Tieren spezifisches Wissen zuschreiben.

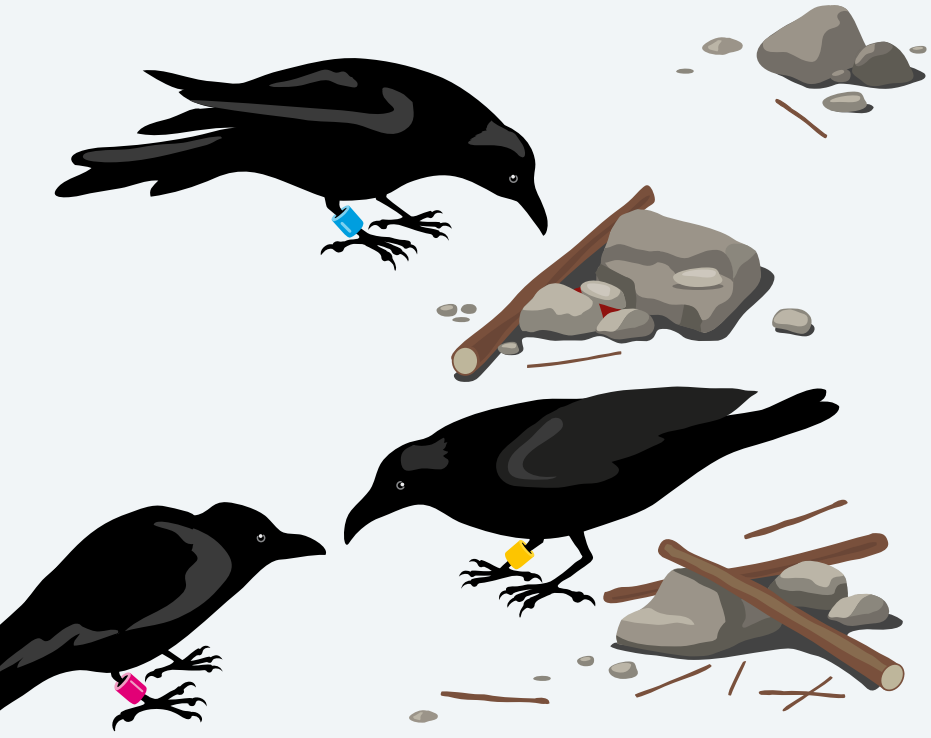
Für die Experimente, die wir hierzu konzipierten, ernannten wir »kundige« und »unkundige« Vögel – jeweils einen, der dem Versuchstier beim Verstecken durch ein Gitter zuschauen konnte, und einen, der nicht hatte zusehen können, aber alles hörte. Diese beiden saßen während der Versteckphase in getrennten Käfigen mit undurchsichtigen Wänden, die wir von der großen Voliere mit dem Testvogel abgeteilt hatten. Es gab lediglich jeweils ein kleines Gitterfenster mit einer Sitzstange davor. Der eine der beiden Vögel konnte von hier aus ins große Gehege blicken. Dem anderen versperrten wir mit einem Vorhang die Sicht.

Wir ließen den Testvogel drei Futterbrocken verbergen, was ein Rabe in ein paar Minuten erledigt. Dann lockten wir ihn für fünf Minuten aus dem Gehege und ließen ihn danach wieder zurück. Teilweise war der Vogel nun allein in der ▷

Versteckspiel



Vermutlich wissen Kolkraben genau, wer ihnen beim Futterverstecken zusieht (oben). Hier war es der auf den Bildern rosa beringte Vogel. Diesen Augenzeugen behält der Versteckbesitzer später scharf im Auge und lässt ihn nicht in die Nähe der verborgenen Beute (unten). Der andere Konkurrent, dessen Fenster zugehängt war, darf überall herumstöbern. (Im Versuch wurde der Versteckbesitzer jeweils nur mit einem dieser beiden Konkurrenten konfrontiert. Die farbigen Ringe dienen allein zur Verdeutlichung auf der Skizze).



▷ Voliere mit seinen Verstecken, teilweise war der Augenzeuge mit anwesend oder aber der unkundige Rabe. Die beiden ausgesperrten Vögel waren vorher darauf versessen gewesen, beim Verstecken zuzusehen – auch der Nichtzeuge, dessen Gardine wir gut befestigen mussten. Um diese Raben zum Beobachten zu motivieren, war ihnen in Vorversuchen immer gleich erlaubt worden, erinnerte Verstecke zu plündern.

Wir bauten darauf, dass die Testraben Verstecke leer räumen würden, die ihnen nicht mehr sicher erschienen. Das pflegen Kolkraben auch unter anderen Umständen zu tun. Wir hatten außerdem darauf geachtet, dass der Testvogel jeweils gegenüber den beiden anderen dominant war, sodass er den potenziellen Dieb verjagen konnte – und um zu verhindern, dass er sich nicht in dessen Nähe traute. Wie erwartet, holten die Testraben am meisten Futterbrocken wieder hervor und suchten sie neu zu verbergen, wenn ein kundiger Artgenosse zugegen war. Bei einem unkundigen Konkurrenten oder auch wenn sie allein waren, bemühten sie sich viel weniger darum. Bezeichnend verhielten sie sich auch, wenn der Augenzeuge einem Versteck näher als zwei Meter kam. Sie jagten ihn dann dort weg. Der unkundige Vogel durfte sich dort aufhalten.

Gedanken lesen und verbergen

War es möglich, dass sich der Testvogel daran erinnerte, ob der anwesende Artgenosse ihn in dem Augenblick zugesehen hatte, als er eine Beute vergrub? Oder wusste er irgendwelche Verhaltenszeichen zu deuten? Zumindest schien er zu wissen, welcher Vogel vorhatte, ein Versteck zu räubern. Das würde bedeuten: Kolkraben verstehen oder unterstellen Absichten anderer und können diesen durch eigenes Verhalten vorgreifen – woher auch immer sie davon wissen.

Für diese These spricht auch die folgende Beobachtung. Die Augenzeugen verhielten sich ihrerseits gegenüber dem Versteckbesitzer auffallend. Sie suchten ein ihnen bekanntes Geheimlager nämlich nicht schnurstracks auf, wenn sich der Besitzer in der Nähe befand. Erst wenn er irgendwo anders beschäftigt war, eilten sie dorthin.

Ob die Testvögel tatsächlich wussten, wer ihnen zugesehen hatte, und sich nun vorstellen konnten, dass dieser Vogel auf ihr Futter scharf war, oder ob sie aus

irgendetwas in dessen Verhalten auf dessen diebische Absichten schlossen, sollte eine weitere Studie klären helfen. Sie verlief im Prinzip ähnlich wie die eben geschilderten Versuche. Diesmal versteckte allerdings ein Mensch die Futterbrocken. Er stand später bei der Versteckssuche nur unbeteiligt herum. Während er die Leckerbissen verbarg, saßen wiederum zwei Raben in den nebeneinanderliegenden abgetrennten Käfigen. Sie konnten sich jedoch durch ein Gitter sehen. Diesmal hatten in manchen Versuchsserien beide Vögel Einblick in die große Voliere. Sie waren somit beide Augenzeugen. In anderen Versuchen bekam nur einer der beiden die Chance.

Diese beiden Vögel ließen wir anschließend gemeinsam in die Voliere mit den Verstecken. Anscheinend war ihnen klar, ob der Versuchspartner vorher hatte zuschauen dürfen oder nicht. Denn sie verhielten sich jeweils anders. Augenzeugen, die es mit einem ebenfalls kundigen Vogel zu tun hatten, beeilten sich, die Verstecke zu plündern. Ganz anders, wenn der andere unkundig und noch dazu dominant war, somit dem kundigen Partner den Bissen wohl klauen würde: Nun dauerte es im Durchschnitt etwa zehnmal so lange, bis der Augenzeuge ein Versteck aufsuchte – in der Regel erst, wenn der dominante Versuchspartner ganz woanders herumstöberte.

Auch mit diesen Ergebnissen lässt sich zwar nicht völlig ausschließen, dass die Versteckbesitzer im vorangegangenen Versuch auf irgendwelche von uns nicht bemerkten Zeichen achteten, die von einem der Verstecke kundigen Raben ausgingen. Das halten wir aber für unwahrscheinlich, denn erste Ergebnisse gegenwärtiger Studien sprechen dagegen. In jedem Fall werten wir die Befunde als starken Hinweis auf erstaunlich kluges, umsichtiges Verhalten – ganz gleich, ob das nun darauf beruhen mag, dass die Vögel momentane Handlungen oder Äußerungen anderer zu deuten wissen oder ob sie deren Vorhaben vorausahnen können.

Es ist grundsätzlich schwer, die Geistestätigkeit von Tieren zu erforschen. Wirklich wissen werden wir vielleicht nie, was und wie Vertreter anderer Arten denken. Das gelingt uns ja nicht einmal bei unseren Mitmenschen. Halten wir uns aber an das wissenschaftliche Prinzip, zunächst von der einfachsten Erklärung auszugehen, dann dürfen wir aus unseren Studien folgern, dass Kolkraben in ihrem Verhalten auch von mentalen Vorstellungen geleitet sind, welche immer das sein mögen. Für die Fleischbrocken am Faden gebrauchten sie offensichtlich Logik. Bei den taktischen Spielchen um die Futterverstecke scheinen sie ihre Konkurrenten danach eingeschätzt zu haben, wann diese sie nach ihrer Erinnerung beobachtet hatten. In dem Fall unterstellten sie ihnen, die Verstecke zu kennen, aber sie taktierten zugleich abhängig vom gegenseitigen Dominanzstatus.

Auch Lernen wirkt bei den komplexen Handlungen mit, erklärt sie aber nicht allein. Dazu tritt solches Verhalten zu rasch auf und vor allem ohne vorheriges Ausprobieren. Wir nehmen an, dass die Vögel dank einem angeborenen Hang zu bestimmten Spielen manches erleben, was sie Zusammenhänge lernen lässt. Auf die Lernerfahrungen mögen sie später mit bewusstem Denken zugreifen – was bedeutet, Logik benutzen zu können. Solche Operationen haben in dem höchst wechselvollen Umfeld der Raben großen Wert. Die Vögel übertragen sie auch auf neue, unnatürliche Situation wie in unseren Studien.

Inwieweit dergleichen geistige Fähigkeiten bei anderen Tieren vorkommen, wissen die Forscher bisher nicht. Vielleicht gibt es das gar nicht einmal so selten. Wir vermuten aber, dass sich solche Kompetenzen normalerweise auf wenige Bereiche beschränken. Wie viel bei einer Tierart die Instinkte leisten und was die Tiere lernen müssen, variiert stark von Art zu Art und ist jeweils auf deren Umwelt zugeschnitten. Die Raben allerdings dürften in vergleichsweise weiten Bereichen logisch operieren können. Das glauben wir, weil sie die verspieltesten Vögel sind, die wir kennen. Immerzu erzeugen sie dadurch neue Situationen und erfahren unvorhergesehene Zusammenhänge. Ihre herausragende Veranlagung mag auch der Hintergrund dafür sein, dass sie die am weitesten verbreiteten Vögel sind. Kolkraben haben die halbe Welt besiedelt. ◁

Bernd Heinrich und **Thomas Bugnyar** erforschen seit Jahren die Intelligenz von Kolkraben. Heinrich wurde in Deutschland geboren und lebt seit seiner Kindheit in den USA. Seit 1980 hat er eine Professur an der Universität von Vermont in Burlington, jetzt als Emeritus. Bugnyar ist Forscher an der Universität Wien und am Konrad-Lorenz-Institut in Grünau (Österreich). Mehrere Jahre arbeitete er an der Universität von Vermont mit Heinrich zusammen. Derzeit lehrt er an der St.-Andrews-Universität in Schottland.

Pilfering ravens, *Corvus corax*, adjust their behaviour to social context and identity of competitors. Von Thomas Bugnyar und Bernd Heinrich in: Animal Cognition, Bd. 9, Heft 4, S. 369, Okt. 2006

Testing problem solving in ravens: String-pulling to reach food. Von Bernd Heinrich und Thomas Bugnyar in: Ethology, Bd. 111, Heft 10, S. 962, Okt. 2005

Ravens, *Corvus corax*, differentiate between knowledgeable and ignorant competitors. Von T. Bugnyar und B. Heinrich in: Proceedings of the Royal Society London, Serie B, Bd. 272, Heft 1573, S. 1641, 22. Aug. 2005

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/874883.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

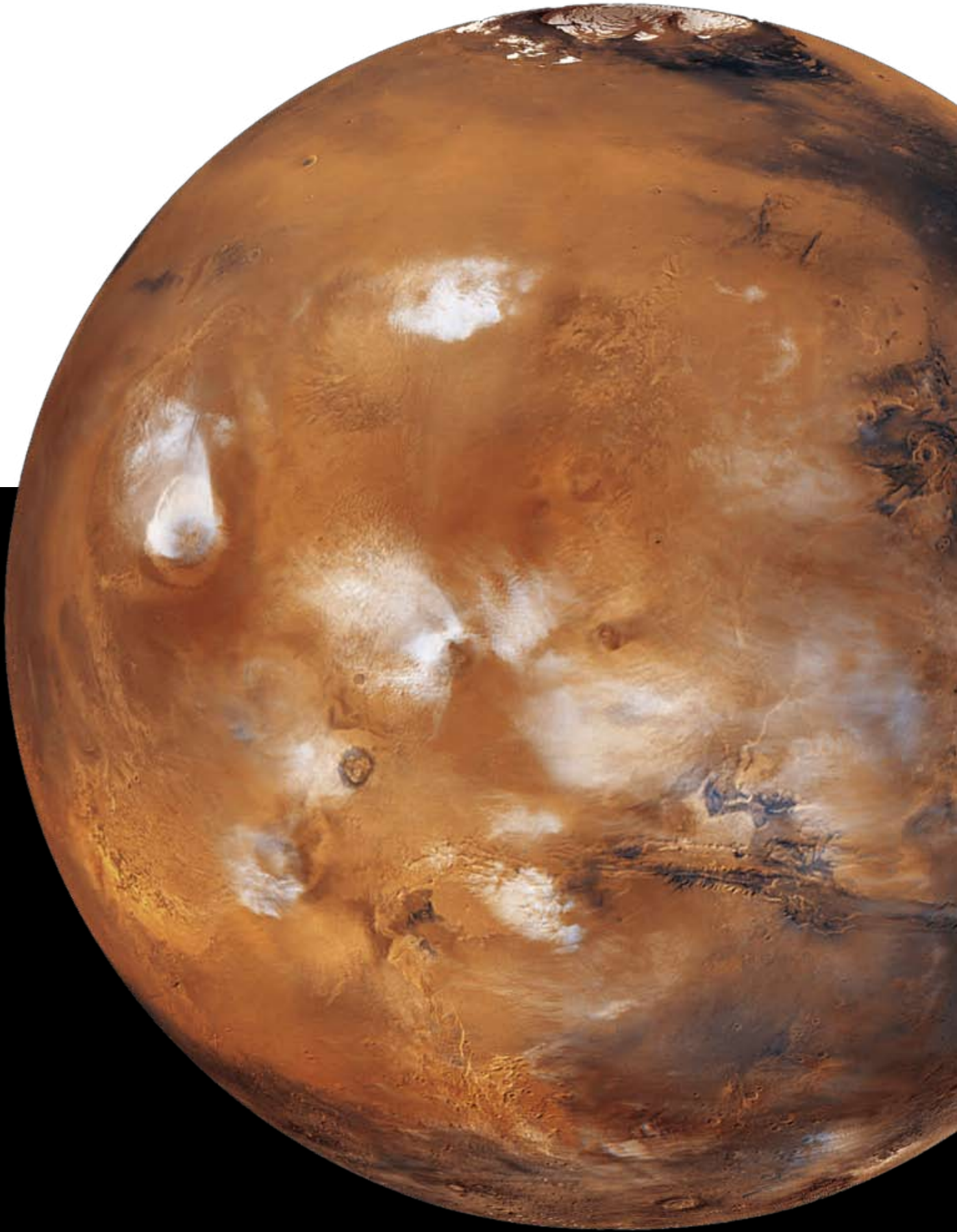
Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Das Rätsel des Methans auf Mars und Titan

Es könnte auf Leben hindeuten oder ungewöhnliche geologische Aktivität: Dass Methan in den Atmosphären des Planeten Mars und des Saturnmonds Titan vorkommt, erweist sich als eines der faszinierendsten Rätsel des Sonnensystems.

BEIDE FOTOS: NASA, JPL / UNIVERSITY OF ARIZONA

Titan ist ein Mond des Saturn, ähnelt jedoch in vieler Weise den erdähnlichen Planeten: Seine Atmosphäre ist dichter als die der Erde, tektonische Aktivitäten und Ströme aus flüssigem Methan gestalten seine Oberfläche. Dieses Infrarotbild nahm der Cassini-Orbiter vergangenes Jahr auf (links). Der Mars (rechts) wird seit Langem als möglicher Hort des Lebens verdächtigt. Ist das Methan in seiner Atmosphäre der erste Beleg dafür?



Von Sushil K. Atreya

Neben der Erde weist der Mars von allen Planeten des Sonnensystems die besten Bedingungen dafür auf, Leben hervorzubringen, sei es heute ausgestorben oder noch vorhanden. Unser Nachbar ähnelt unserer kosmischen Heimat in vieler Hinsicht: wie er entstand, dass es dort zumindest in seiner frühen Klimageschichte flüssiges Wasser gab, Vulkane ausbrachen und andere geologische Prozesse abliefen. Hätten dort sogar Mikroorganismen gelebt, würde das kaum überraschen. Reden Forscher von möglichen Nischen des Lebens, wird auch Titan, Saturns größter Mond, immer wieder genannt. Womöglich waren auch dort die Bedingungen dafür günstig, dass Leben entstehen konnte – und vielleicht bis heute existiert.

Das sind zwar Spekulationen, doch als Astronomen diese beiden Welten chemisch untersuchten, stießen sie auf ein Gas, das zumindest auf der Erde überwiegend auf Lebewesen zurückgeht: Methan. Auf dem Mars gibt es davon nur Spuren, doch auf Titan ist es reichlich vorhanden. Dass Lebewesen die Quelle des Gases sind, ist zumindest auf den ersten Blick genauso plausibel wie die Möglichkeit, es könne auf geologischen Prozessen beruhen. Beides wäre faszinierend. Entweder würden wir lernen, dass wir im Kosmos nicht allein sind oder dass Mars und Titan einmal große Mengen unterirdischen Wassers besaßen, in dem sich bestimmte geochemische Prozesse ereigneten. Beginnen wir den Ursprung und das Schicksal des Methans auf diesen Himmelskörpern zu verstehen, werden wir Neues darüber erfahren, wie erdähnliche Himmelskörper entstehen, sich entwickeln – und dabei womöglich Leben hervorbringen.

Aus den Mägen der Wiederkäuer

In den Atmosphären der Riesenplaneten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun kommt Methan (CH_4) häufig vor. Es ist ein Produkt chemischer Prozesse, die sich im solaren Urnebel abspielten. Auf der Erde wurde das Gas überwiegend von anderen Quellen freigesetzt: Es stellt 1750 milliardstel Volumenanteile in der Luft (kurz: 1750 ppbv), und davon sind 90 bis 95 Prozent biologischen Ursprungs. Gras fressende Huftiere wie Kühe, Ziegen und Yaks bewirken ein

Ein Treibhausgas auf Mars …

Auf dem Roten Planeten existiert Methan nur in Konzentrationen von wenigen milliardstel Volumenanteilen (parts per billion by volume, ppbv); es ist nicht direkt sichtbar. Verschiedene Prozesse könnten es zerstören oder produzieren.

1 Staubteufel reiben Staubteilchen aneinander und erzeugen dabei starke elektrostatische Felder. Diese können Wassermoleküle spalten und zur Bildung von Peroxiden führen, die Methan zerstören. Dieses Bild wurde am 21. Mai 2002 vom Mars Global Surveyor aufgenommen.

2 Wasser, das in der Vergangenheit des Mars unterirdisch floss, könnte diesen schmalen weißlichen Gebirgszug erklären, den die Sonde Mars Reconnaissance Orbiter vor Kurzem aufnahm. Durch Brüche im Gestein fließendes Wasser könnte Mineralien abgeschieden haben, so wie hartes Wasser in Rohrleitungen im Haushalt Rückstände hinterlässt. Als der umgebende Fels wegerodiert war, blieben die Mineralien als Gebirgszug zurück. Wasser unter der Oberfläche würde auch die Methanproduktion erleichtert haben.

MARS (OBEN) UND STAUBTEUFEL (1): NASA, JPL / MSSS; GEBIRGSZUG (2): NASA, JPL / UNIVERSITY OF ARIZONA

METHAN	Erde	Mars	Titan
Atmosphärische Konzentration	1750 ppbv	10 ppbv	5 Prozent
Lebensdauer des Moleküls (Jahre)	10	600	10 Millionen
Notwendige Produktionsrate, um eine konstante Menge zu erhalten (Tonnen pro Jahr)	515 Millionen	125	25 Millionen
Hauptquellen	Rinder, Termiten, Sümpfe, Reisfelder, Erdgas	Bakterien? Chemische Reaktion zwischen Mineralen und Wasser?	Unterirdische chemische Reaktion zwischen Mineralen und Wasser

Fünftel des gesamten jährlichen Ausstoßes von Methan in die Atmosphäre – ein Nebenprodukt des Stoffwechsels von Bakterien in ihren Verdauungsorganen. Bedeutende Quellen sind auch Termiten, Reisfelder, Sümpfe, aus der Erde leckendes Erdgas (selbst das Resultat früheren Lebens) sowie die Fotosynthese von Pflanzen (siehe SdW 5/2007, S. 68). Vulkane tragen weniger als 0,2 Prozent zum Methanausstoß bei und sie geben vielleicht nur ab, was Organismen in der Vergangenheit produzierten. Abiotische Methanquellen sind auf der Erde unbedeutend. Da ist es kein Wunder, dass Forscher sofort an Leben denken, wenn sie Methan auf erdähnlichen Objekten im Sonnensystem finden.

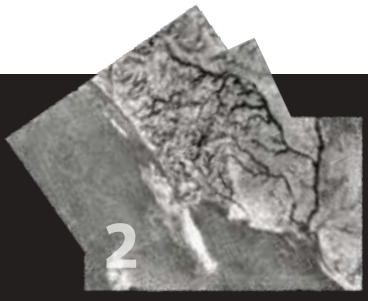
Genau dies geschah, als im Jahr 2004 drei unabhängige Gruppen von Wis- ▷

In Kürze

▶ Seit über einem Jahrhundert rätseln Astronomen über **Leben auf dem Mars**, aber selten auf Grundlage harter Fakten. Das änderte sich im Jahr 2003 mit der Entdeckung des Treibhausgases Methan in seiner Atmosphäre. Irgendein Prozess muss es freisetzen, um seinen ständigen Abbau durch Sonnenlicht auszugleichen.

▶ Methanbildner könnten das Gas freisetzen – **Bakterien**, wie sie auf der Erde in den Eingeweiden von Kühen oder in Reisfeldern existieren. Möglich wäre aber auch die Serpentinisierung – eine chemische Reaktion von Mineralen und Wasser, die auf der Erde in der Tiefsee beobachtet wurde. Demzufolge müsste es noch heute im Gestein des Mars große Wasservorräte geben.

▶ Auch auf Titan, dem größten Saturnmond, wurde Methan entdeckt. Im Jahr 2005 bestätigte die Huygens-Kapsel nicht nur, dass dieses Gas nach Stickstoff der zweitgrößte Bestandteil der Titanatmosphäre ist, sondern auch, dass es praktisch dieselbe Rolle spielt wie Wasser auf der Erde. Dass seine Entstehung auf **geologischen Prozessen** beruht, ist wahrscheinlicher als auf dem Mars.



… und Titan

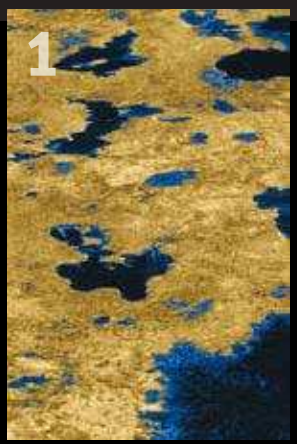
Der niederländische Astronom Gerard P. Kuiper entdeckte bereits im Jahr 1944 Methan in der Titanatmosphäre, doch ein dichter Dunst versperrte bis vor Kurzem den Blick auf die Oberfläche des Saturnmonds. Erst die Bilder der Mission Cassini-Huygens lassen erkennen, wie sehr Methan die Landschaft formt.

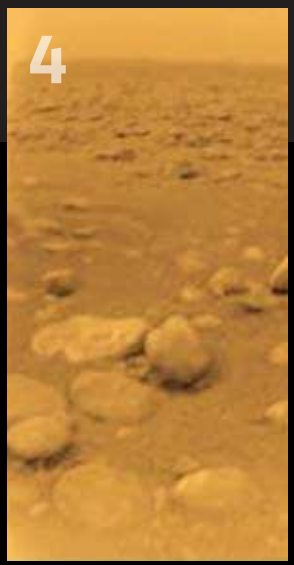
1 Dieses Radarbild der Raumsonde Cassini zeigt große Gewässer in hohen nördlichen Breiten Titans; wahrscheinlich sind sie aus Methan. Die Flüssigkeit erscheint aus dem gleichen Grund dunkel (blau dargestellt) wie eine nasse Straße, über die man nachts mit dem Auto fährt: Das Sonnenlicht, das vom Rücken der Sonde her einfällt, wird von der Kamera wegreflektiert. Umgekehrt erscheint trockenes, raues Gelände hell (gelbbraun). Dieses Bild hat eine Auflösung von 500 Metern.

2 Die Flusskanäle könnten durch Methan gegraben worden sein, das von Hügeln, die bis zu 200 Meter hoch sind, in ein (jetzt trockenes) Bett eines Sees strömte. Dem Muster der Zuflüsse zufolge fiel das Methan als Regen. Die Huygens-Kapsel nahm dieses Bild während ihres Abstiegs durch die Atmosphäre aus 6,5 Kilometer Höhe auf.

3 Durch fotochemische Reaktionen von Sonnenlicht mit Methan entstehen in der Titanatmosphäre Kohlenwasserstoffe, die einen Dunst bilden, der dem Smog unserer Städte ähnelt. Dieses Bild hat eine Auflösung von 700 Metern.

4 Die ersten Bilder der Oberfläche Titans nahm die Sonde Huygens nach ihrer Landung im Januar 2005 auf. Was auf den ersten Blick wie eine Ebene voller Felsbrocken aussieht, ist tatsächlich eine Landschaft aus faustgroßen Eisblöcken. Bei genauem Hinsehen sind Erosionsspuren zu erkennen, die auf das Wirken einer Flüssigkeit hindeuten – wahrscheinlich Methan. Als die Raumkapsel, durch die Reibung in der Atmosphäre erhitzt, den Titanboden erwärmte, gaste Methan aus.





TITAN (UNTEN): NASA, JPL / U. ARIZONA; TITANSEEN (1): NASA, JPL / USGS; FLUSSKANÄLE (2) UND OBERFLÄCHE TITANS (4): ESA / NASA, JPL / U. ARIZONA; DUNST (3): NASA, JPL / SSI

senschaftlern die Entdeckung von Methan in der Marsatmosphäre bekannt gaben. Mit einem hochauflösenden Spektrografen der Infrared Telescope Facility (IRTF), einem Infrarotteleskop auf Hawaii, sowie dem Teleskop Gemini South in Chile, konnte Michael Mumma vom Goddard Space Flight Center der Nasa zusammen mit seinen Kollegen eine Methankonzentration von mehr als 250 ppbv nachweisen, die von Ort zu Ort schwankte und sich mit der Zeit veränderte.

Vittorio Formisano vom Institut für Physik und Interplanetare Forschung in Rom und seine Kollegen, darunter auch ich, analysierten mehrere tausend Infrarotspektren der europäischen Sonde Mars Express. Zwar fanden wir Methan, jedoch in viel geringerer Menge: nur zwischen 0 und 35 ppbv. Über Gebieten, in denen unterirdisches Wassereis existiert, ist die Konzentration anscheinend erhöht. Mit dem Canada-France-Hawaii-Teleskop auf Hawaii maßen Vladimir Krasnopolsky von der Katholischen Universität von Amerika in Washington D. C. und seine Kollegen einen Mittelwert von etwa 10 ppbv. Ob es einzelne, begrenzte Quellen des Gases gibt, konnten sie mit ihren gering aufgelösten Daten nicht beurteilen.

Inzwischen analysieren Mumma und seine Kollegen ihre Messungen erneut. Sie versuchen herauszufinden, warum sie auf einen so viel größeren Wert stießen. Vorerst gilt ein Wert von etwa 10 ppbv als besonders wahrscheinlich. Bezogen auf die Zahl der Moleküle pro Luftvolumen ist dies nur ein 40-Millionstel der irdischen Konzentration.

Dass Titan eine Atmosphäre besitzt und diese Methan enthält, hatte der niederländische Astronom Gerard P. Kuiper bereits 1944 entdeckt. Als ein Vierteljahrhundert später deutlich wurde, dass diese Atmosphäre vor allem aus Stickstoff besteht, war die Neugier der Forscher geweckt, denn immerhin ist dies eine Schlüsselkomponente biologischer Moleküle wie Aminosäuren und Nukleinsäuren. Die Stickstoff-Methan-Atmosphäre Titans, an deren Boden der anderthalbfache Druck der Erdatmosphäre in Meereshöhe herrscht, könnte durchaus molekulare Vorläufer des Lebens hervorgebracht haben.

Zweifellos spielt Methan auf dem Saturnmond eine entscheidende Rolle. Es ist die Quelle eines Dunstes aus Kohlenwasserstoffen, welcher die Infrarotstrahlung der Sonne absorbiert und so die Stratosphäre um rund 100 Kelvin erwärmt. Dem Methan entstammen auch die Wasserstoffmoleküle in der Titanatmosphäre, deren Kollisionen die Temperatur der Troposphäre um weitere 20 Kelvin ansteigen lässt. Sänke der Methangehalt, würde der Methanregen erlahmen, der Titans Oberfläche entscheidend prägt. Seen, Tümpel und Flüsse trockneten aus, die Temperatur der Atmosphäre fiele ab und das Stickstoffgas würde zu kleinen Tröpfchen kondensieren. Die Atmosphäre würde kontrahieren, und indem sich Smog und Wolken auflösten, verlöre sie ihren einzigartigen Charakter. Ohne ihren Schleier bliebe eine dünne Atmosphäre zurück, die derjenigen anderer Monde im Sonnensystem ähnelte.

Die Konzentration von Methan auf dem Roten Planeten von Ort zu Ort schwankt. Dies könnte auf örtlich begrenzte Quellen hindeuten

Jährlich 100 Tonnen Methan

Unser Verständnis geophysikalischer, chemischer und biologischer Prozesse hilft, mögliche Methanquellen auf dem Mars zu identifizieren. Manche dieser Erkenntnisse lassen sich anschließend auf den Titan übertragen. Zunächst müssen wir die Methanbilanz der beiden Himmelskörper kennen lernen, also wie viel von diesem Gas dort entsteht und zerstört wird, wie viel womöglich von außen herangetragen wird und im interplanetaren Raum verloren geht. Die ultraviolette Strahlung der Sonne spaltet Methanmoleküle in Höhen oberhalb von 60 Kilometern über der Marsoberfläche. Tiefer in der Atmosphäre wird Methan von Sauerstoffatomen und Hydroxylradikalen (OH) oxidiert, die entstehen, wenn ultraviolette Photonen Wassermoleküle aufbrechen.

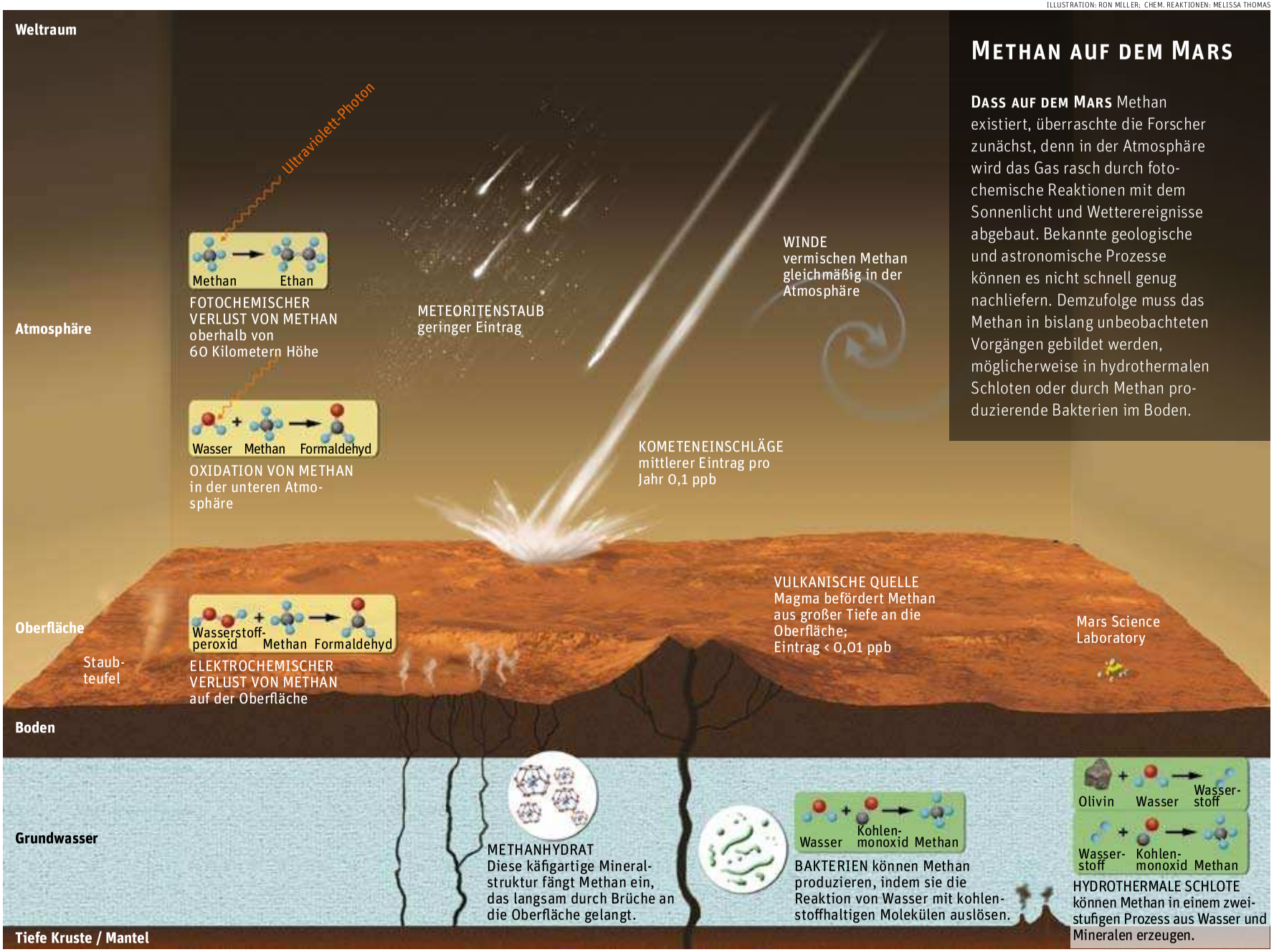
Gäbe es keinen Nachschub, würde das Methan allmählich aus der Atmosphäre verschwinden. Die atmosphärische »Lebensdauer« von Methan – definiert als die Zeit, in der die Konzentrationen auf das $1/e$-Fache abfällt (wobei $e \approx 2{,}72$ die Eulersche Zahl ist) – beträgt 300 bis 600 Jahre. Sie hängt von der Menge des Wasserdampfs ab, die jahreszeitlich schwankt, sowie von der Intensität der Sonneneinstrahlung, die mit dem Sonnenzyklus variiert. Auf der Erde führen ähnliche Prozesse dazu, dass Methan eine Lebensdauer von zehn Jahren erreicht. Auf dem Titan, wo die solare Ultraviolettstrahlung viel schwächer ist und Moleküle, die Sauerstoff enthalten, deutlich seltener vorkommen, kann Methan 10 bis 100 Millionen Jahre überdauern. Verglichen mit dem Alter dieses Mondes ist das eine kurze Zeitspanne, doch sie reicht bei Weitem aus, um das Gas durch Winde und Diffusionsprozesse gleichmäßig in der Atmosphäre zu verteilen.

Angesichts dieser vermeintlich gründlichen Durchmischung ist es bemerkenswert, dass auf dem Mars die Konzentration des Gases anscheinend schwankt. Womöglich stammt es aus örtlich sehr begrenzten Quellen oder verschwindet in ebenso begrenzten Senken. Chemisch reaktionsfreudige Böden könnten durchaus den Verlust von Methan beschleunigen. Gäbe es derartige, zusätzliche Senken, wären noch ergiebigere Quellen notwendig, um den beobachteten Gehalt zu erklären.

Doch wie entsteht das Methan? Betrachten wir diese Frage zunächst für den Mars; denn wenn ein bestimmter Mechanismus nicht einmal die geringe Menge erklären kann, die wir dort messen, wird er für die große Konzentration auf Titan kaum in Frage kommen. Mit einer Lebensdauer von 600 Jahren müssen jedes Jahr etwas mehr als 100 Tonnen Methan produziert werden, um einen globalen Mittelwert von 10 ppbv zu erhalten – ein Viermillionstel der irdischen Produktionsrate.

Wie auch auf der Erde sind Vulkane dafür wohl kaum verantwortlich. Seit mehreren hundert Millionen Jahren sind

ILLUSTRATION: RON MILLER; CHEM. REAKTIONEN: MELISSA THOMAS



Methan auf dem Mars

Dass auf dem Mars Methan existiert, überraschte die Forscher zunächst, denn in der Atmosphäre wird das Gas rasch durch fotochemische Reaktionen mit dem Sonnenlicht und Wetterereignisse abgebaut. Bekannte geologische und astronomische Prozesse können es nicht schnell genug nachliefern. Demzufolge muss das Methan in bislang unbeobachteten Vorgängen gebildet werden, möglicherweise in hydrothermalen Schloten oder durch Methan produzierende Bakterien im Boden.

die Marsvulkane inaktiv, die Atmosphäre ist frei von Schwefelverbindungen. Hätten Vulkane das Methan freigesetzt, hätten sie auch enorme Mengen Schwefeldioxid ausgestoßen. Auch der Methaneintrag aus dem Weltraum ist gering. Etwa 2000 Tonnen Mikrometeoritenstaub erreichen pro Jahr die Marsoberfläche. Weniger als ein Prozent ihrer Masse ist Kohlenstoff. Dieser ist größtenteils oxidiert und scheidet damit als bedeutende Methanquelle aus. Immerhin besteht bis zu einem Prozent der Masse von Kometen aus Methan, doch sie treffen den Mars im Mittel nur einmal alle 60 Millionen Jahre. Das ergäbe nur eine Tonne pro Jahr – weniger als ein Hundertstel der benötigten Menge.

Möglich scheint zunächst, dass ein Komet den Mars in der jüngeren Vergangenheit getroffen hat. Er könnte eine große Menge Methan hinterlassen haben. Im Lauf der Zeit wäre der Atmosphärengehalt dann auf den heutigen Wert gesunken. Der Einschlag eines Kometen mit einem Durchmesser von 200 Metern vor 100 Jahren oder eines Kometen mit 500 Meter Durchmesser vor 2000 Jahren könnte ausreichend viel Methan geliefert haben, um die heutige Konzentration von 10 ppbv zu erklären. Rätselhaft bleibt so jedoch die ungleichmäßige Verteilung des Gases auf dem Planeten. Es dauert höchstens ein paar Monate, bis es sich gleichmäßig verteilt – vertikal und horizontal. Ein Komet als Ursache kann deshalb die Beobachtungen nicht erklären.

Damit bleiben zwei mögliche Quellen übrig: hydrogeologische und mikrobiologische Prozesse. Hydrothermale Schlote in der irdischen Tiefsee, so genannte Schwarze Raucher *(Black Smoker)*, wurden erstmals 1977 am Galapagos-Rücken entdeckt. Seither gelang es Ozeanografen, sie auch entlang anderer mittelozeanischer Rücken zu finden. Die heißen und feuchten Bedingungen an den Schloten führen dazu, dass sich so genannte ultramafische Silikate – Gesteine, die reich an Eisen oder Magnesium sind, wie etwa Olivin und Pyroxen – in Serpentinit verwandeln, ein metamorphes Gestein. Bei dieser Serpentinisierung wird Wasserstoff frei, der wiederum mit Kohlenstoff, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid oder kohlenstoffhaltigen Mineralen reagiert. Dabei entsteht Methan.

Gestein als Gasspeicher

Schlüsselelemente des Prozesses sind Wasserstoff, Kohlenstoff, Metalle (die als Katalysatoren wirken), Wärme und Druck. Kommen sie auf dem Mars zusammen, sollte auch dort Methan entstehen. Die Serpentinisierung kann bei hohen Temperaturen (350 bis 400° C) ablaufen, aber auch bei niedrigeren (30 bis 90° C). Letztere könnte im Grundwasser eintreten, das auf dem Mars vermutlich existiert. Bemerkenswert ist dabei, dass die Serpentinisierung ein exothermer, also Wärme produzierender Prozess ist – und sich so die Voraussetzung für ihr Fortlaufen selbst schafft. Zwar könnte dieser Vorgang bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen durchaus das Methan auf unserem Nachbarplaneten produziert haben, Lebensformen lassen sich als alternative Ursachen jedoch nicht ausschließen.

Auf der Erde setzen methanogene Bakterien, die so genannten Methanbildner, dieses Gas bei ihrem Energiestoffwechsel frei, wenn sie Wasserstoff, Kohlenmonoxid oder Kohlendioxid verbrauchen. Auf dem Mars sind diese »Nährstoffe« reichlich vorhanden: Wasserstoff wird bei der Serpentinisierung frei und diffundiert aus der Atmosphäre in den Boden, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid existieren sowohl im Gestein als auch in der Atmosphäre.

Ist Methan erst einmal entstanden, kann es als stabiles Klathrathydrat gespeichert werden, eine physikalische Struktur, welche die Methanmoleküle wie ein Käfig umgibt. Später kann es in die Atmosphäre entweichen, sowohl durch allmähliches Ausgasen bei Brüchen im Gestein als auch in episodischen Ausbrüchen. Ob sich auf dem Mars Klathrate bilden und wie leicht sie sich wieder auflösen, ist ungewiss – und damit bleibt fraglich, ob sie dort als Methanspeicher wirken. Allein deshalb sind biologische Prozesse als Alternative weiterhin möglich.

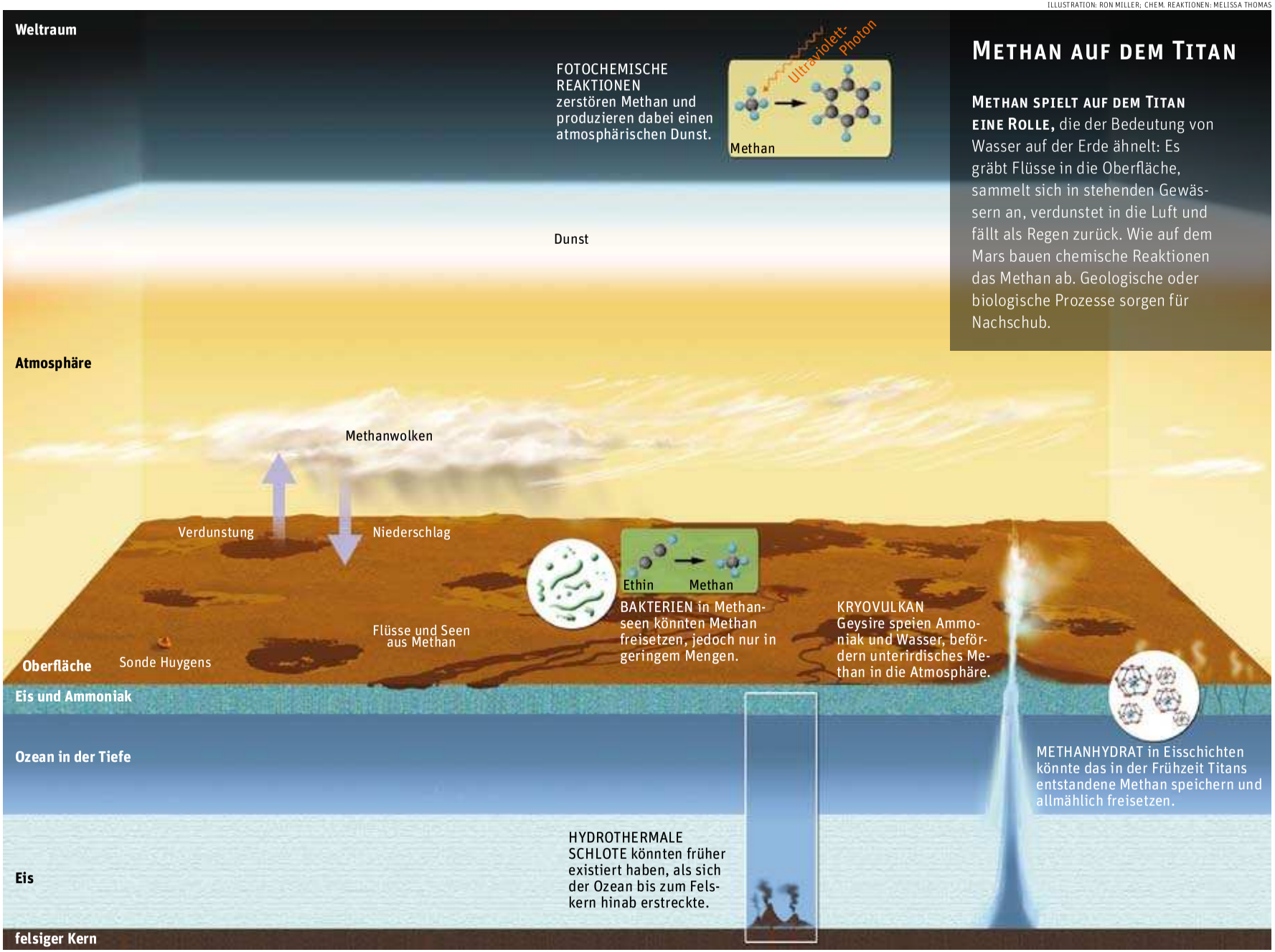
Dass die Messungen von Mars Express auf eine erhöhte Methankonzentrationen über Gebieten hindeuten, in denen unterirdisches Eis aus Wasser existiert, lässt sich sowohl durch geologische als auch durch biologische Prozesse deuten. Grundwasservorräte unter dem Eis sind mögliche Stätten hydrothermaler chemischer Prozesse, eignen sich vielleicht aber auch als Lebensräume von Bakterien. Ohne zuverlässigere Daten lassen sich diese Hypothesen nicht gegeneinander abwägen.

Auf den ersten Blick scheint es einfacher zu sein, die Existenz von Methan auf Titan zu verstehen. Schließlich ist der Saturnmond im solaren Urnebel vermutlich in der Nachbarschaft des methanreichen Riesenplaneten entstanden. So kann man vermuten, das heute auf dem Mond vorkommende Methan sei ein Überrest der Entstehungszeit. Dagegen sprechen jedoch neue Messungen der Huygens-Sonde der europäischen Raumfahrtbehörde Esa, die – von der Raumsonde Cassini abgetrennt – im Januar 2005 auf Titan landete. Messdaten aus der Atmosphäre des Mondes zeigten, dass die Elemente Xenon und Krypton dort fehlen und Argon sehr selten ist. Hätten die Planetesimale genannten Bausteine, aus denen Titan entstand, Methan enthalten, sollte es darin auch diese schweren Edelgase gegeben haben. Dass sie nicht nachzuweisen sind, spricht für den Titan als Entstehungsort des Methans.

Das Vorkommen dieses Gases auf dem Saturnmond ist damit zumindest so rätselhaft wie dasjenige auf dem Mars – vielleicht sogar noch mehr, da es auf Titan mit immerhin fünf Volumenprozent der Atmosphäre viel häufiger ist. Wie auf dem Mars bietet die Serpentinisierung bei relativ geringer Temperatur eine mögliche Erklärung. Christophe Sotin von der Universität von Nantes (Frankreich) und seinen Kollegen zufolge

Im Boden von Mars und Titan könnten sich hydrothermale Prozesse abspielen, die wir aus der Tiefsee der Erde kennen

ILLUSTRATION: RON MILLER; CHEM. REAKTIONEN: MELISSA THOMAS



Methan auf dem Titan

Methan spielt auf dem Titan eine Rolle, die der Bedeutung von Wasser auf der Erde ähnelt: Es gräbt Flüsse in die Oberfläche, sammelt sich in stehenden Gewässern an, verdunstet in die Luft und fällt als Regen zurück. Wie auf dem Mars bauen chemische Reaktionen das Methan ab. Geologische oder biologische Prozesse sorgen für Nachschub.

▷ könnte der Saturnmond einen unterirdischen Ozean aus flüssigem Wasser besitzen. Wäre Ammoniak darin gelöst, würde es als Gefrierschutz wirken. Die Wissenschaftler entwarfen ein Modell, in dem sich der Ozean in einer Tiefe von 100 bis 300 oder 400 Kilometern unter der Oberfläche befindet. Früher könnte die Wärme, die beim Zerfall radioaktiver Elemente frei wurde oder aus der Entstehungszeit des Sonnensystems übrig war, fast das gesamte Eis des Körpers geschmolzen haben. Der Ozean hätte in diesen Fall dann bis hinab zum felsigen Kern gereicht.

Unter derartigen Bedingungen könnten Reaktionen zwischen Wasser und Gestein Wasserstoffgas produziert haben, das mit Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und kohlenstoffhaltigem Gestein Methan erzeugte. Nach meiner Einschätzung ist der beobachtete Methangehalt der Titanatmosphäre so zu erklären. Ein Teil dieses Gases kann als stabiles Methanhydrat gespeichert worden sein und wäre erst im Lauf der Zeit freigesetzt worden – etwa durch Vulkanismus oder den Einschlag von Kometen.

Das von der Sonde Huygens in der Titanatmosphäre nachgewiesene Isotop Argon-40 ist besonders aufschlussreich. Es entstand vermutlich beim radioaktiven Zerfall von Kalium-40, das im Gestein tief in Titans Kern steckt. Da die radioaktive Halbwertszeit von Kalium-40 ungefähr 1,3 Milliarden Jahre beträgt, spricht der geringe Argon-40-Gehalt der Atmosphäre dafür, dass es langsam aus dem Mondinneren freigesetzt wurde.

Geysire, die Eis speien

Darüber hinaus kann man auf Bildern der Titanoberfläche Anzeichen von Kryovulkanismus erkennen: geysirartige Eruptionen von Ammoniak-Wasser-Eis, die ebenfalls bezeugen, dass Material aus dem Inneren emporkommt. Dass auf der Titanoberfläche nur äußerst wenige Krater existieren und sie demzufolge geologisch jung ist, ergänzt dieses Bild. Die geschätzte Rate der Oberflächenneubildung würde für einen ausreichenden Nachschub von Methan aus dem Inneren reichen, der die fotochemischen Verluste ausgleicht.

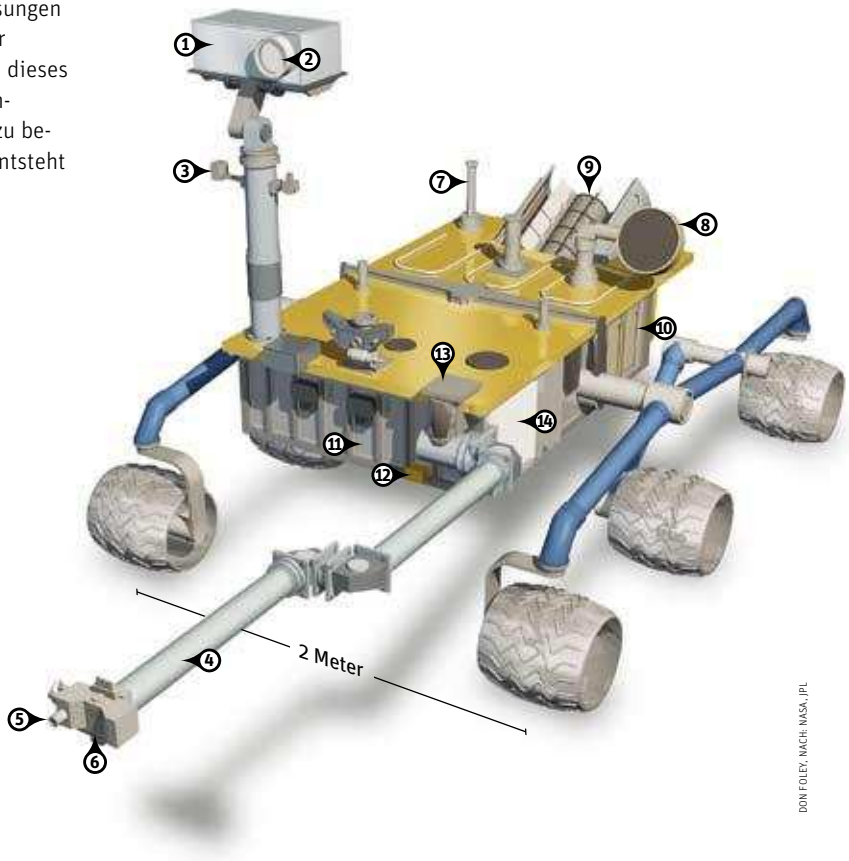
Die Bedeutung des Methans auf dem Titan lässt sich in mancher Weise mit dem Wasser auf der Erde vergleichen, sowohl was das flüssige Vorkommen auf der Oberfläche angeht als auch die Bildung von Wolken und Regen – ohne Weiteres kann man anstatt eines hydrologischen von einem »methanologischen Zyklus« sprechen. Dass im Boden gespeichertes Methan an die Oberfläche gelangen und dann in die Atmosphäre verdunsten könnte, gehört dazu.

Doch welche Rolle könnten biologische Prozesse in diesem Bild spielen? Christopher McKay vom Ames-Forschungszentrum der Nasa, Heather Smith von der International Space University in Straßburg, Dirk Schulze-Makuch von der Staatsuniversität von Washington in Pullman sowie David

Der nächste Marsrover

Um das rätselhafte Vorkommen von Methan auf unserem Nachbarplaneten zu erklären, werden Messungen des Mars Science Laboratory helfen, dessen Start für das Jahr 2009 vorgesehen ist. Mit den Instrumenten dieses Rovers wird es möglich sein, die Isotopenzusammensetzung des Marsbodens sowie des Methans genau zu bestimmen. Auch auf die Prozesse, in denen das Gas entsteht und abgebaut wird, wird er neue Hinweise liefern.

1. Kamera
2. Spektrograf
3. Wetterstation
4. Greifarm zum Sammeln von Proben
5. Makrokamera
6. Röntgenspektrometer zur Analyse von Gestein und Boden
7. Hochfrequenzantenne
8. Parabolantenne
9. Stromgenerator
10. Neutronendetektor (für die Suche nach unterirdischem Wasser)
11. Röntgenbeugungsinstrument (für die Analyse von Mineralien)
12. Abstiegskamera
13. Strahlungsdetektor
14. Instrumente für die Analyse organischen Materials



DON FOLEY; NACH: NASA, JPL

Grinspoon vom Wissenschafts- und Naturmuseum in Denver (Colorado) schlugen vor, dass Ethin (Acetylen) und Wasserstoff in der extremen Kälte auf Titans Oberfläche (–179° C) Nährstoffe methanogener Bakterien sind. Diese könnten in einer Umgebung leben, die flüssige Kohlenwasserstoffe an Stelle von flüssigem Wasser enthält, so wie es auf der Erde und womöglich auch dem Mars der Fall ist.

Dabei gibt es jedoch ein Problem. Auf Grund der Huygens-Daten können wir ausschließen, dass das Acetylen auf dem Titan aus dessen Tiefe kommt – vielmehr scheint es vom atmosphärischen Methan zu stammen. Daraus folgt ein Zirkelschluss: Um mit Mikroben Methan zu erzeugen, braucht man Methan. Darüber hinaus müssten die Methanbildner außerordentlich produktiv sein, um die große Menge des Gases zu erzeugen, die wir beobachten. Dass Bakterien das Methan auf Titan produziert haben, erscheint damit fraglich.

Dennoch halten es einige Forscher für plausibel, dass der Mond einst bewohnbar war – oder dies sogar noch ist. So reicht die Sonneneinstrahlung dort aus, um Stickstoff und Methan in Moleküle zu verwandeln, die auf der Erde an biologischen Prozessen beteiligt sind. Ein unterirdisches Reservoir aus Wasser und Ammoniak, das auch Methan und andere Kohlenwasserstoffen enthält, könnte für komplexe Moleküle oder gar Organismen eine günstige Umwelt darstellen. Womöglich floss in der fernen Vergangenheit, als sich der junge Titan noch abkühlte, sogar flüssiges Wasser auf seiner Oberfläche.

Isotope als Lebenszeichen

Um den Ursprung des Methans auf unserem Nachbarplaneten und dem Saturnmond zu ergründen, könnte es entscheidend sein, das Verhältnis der in einem Molekül des Gases enthaltenen Kohlenstoffisotope zu messen. Das irdische Leben bevorzugt Kohlenstoff-12, das eine geringere Bindungsenergie aufweist als Kohlenstoff-13. In Aminosäuren gibt es fast ausschließlich Kohlenstoff-12. Auf der Erde lebende Organismen enthalten 92- bis 97-mal so viel Kohlenstoff-12 wie Kohlenstoff-13, in anorganischer Materie ist das Verhältnis charakteristischerweise 89,4.

Mit dem Mars Science Laboratory wird es gelingen, Gas und Gesteine auf chemische Anzeichen von Lebenin der Vergangenheit und Gegenwart des Roten Planeten zu untersuchen

Im Methan auf Titan maß die Huygens-Kapsel jedoch ein $^{12}C/^{13}C$-Verhältnis von 82,3 – es ist kleiner und nicht etwa größer als der irdische Standardwert für anorganische Materie. Diese Zahl widerspricht der Annahme, es könne dort Leben existiert haben, das dem irdischen ähnelt. Manche Forscher halten dagegen, das Leben auf dem Titan hätte sich womöglich anders entwickelt.

Das Kohlenstoff-Isotopenverhältnis auf dem Mars ist bis heute unbekannt. Weil die Konzentration des Gases so gering ist und nur ein Milliardstel des Titan-Wertes beträgt, ist es außerordentlich schwierig, dies zu messen. Das könnte jedoch bereits mit dem Mars Science Laboratory gelingen, einem Rover der Nasa, der den Planeten im Jahr 2010 erreichen soll. Er wird auch feste und gasförmige Proben nach anderen chemischen Anzeichen vergangenen oder heutigen Lebens untersuchen – darunter den großen Anteil von Methan am Vorrat der Kohlenwasserstoffe sowie die Chiralität (Händigkeit) in der Struktur organischer Moleküle.

Mit solchen Messungen werden wir vielleicht auch die Frage beantworten können, warum es auf der Oberfläche des Mars anscheinend kein organisches Material gibt. Auch ohne dass dort Lebewesen entstanden sind, sollten es Meteoriten, Kometen und interplanetare Staubteilchen in Verlauf der letzten 4,5 Milliarden Jahren eingetragen haben.

Vielleicht ist die Antwort in den Windhosen und den Stürmen zu finden, die immer wieder auf der Oberfläche dokumentiert wurden. Beim Herumwirbeln der Staubteilchen entstehen starke elektrische Felder, die durchaus die Synthese von Wasserstoffperoxid ermöglichen. Dieses wirkungsvolle Antiseptikum würde die Oberfläche rasch sterilisieren. Als Oxidationsmittel würde es auch den Methanverlust aus der Atmosphäre beschleunigen. In diesem Fall wäre eine große Quelle erforderlich, um die beobachtete Menge zu erklären.

Das Methan auf Mars und Titan gibt uns weiterhin Rätsel auf, die wir vielleicht durch zukünftige Forschungen lösen können. Dass dieses Treibhausgas auf der Erde überwiegend aus biologischen Prozessen stammt, lässt sich nicht auf andere Himmelskörper übertragen. Wir müssen die Quellen und Senken des Gases sowie die Isotopenzusammensetzung intensiv erforschen und auch die Spuren von anderen organischen Moleküle in gasförmigen und festen Proben untersuchen.

Selbst wenn sich schließlich herausstellen sollte, dass das Methan nicht durch biologische Prozesse entstand, werden wir mit der Erforschung seines Ursprungs grundlegende Aspekte der Bildung, Klimageschichte, Geologie und Entwicklung von Mars und Titan enthüllen. ◁

Sushil K. Atreya ist Professor an der Universität von Michigan in Ann Arbor und Visiting Scientist am Jet Propulsion Laboratory der Nasa in Pasadena (Kalifornien). Er war an zahlreichen wissenschaftlichen Missionen der Nasa und der Esa beteiligt und ist einer der Projektwissenschaftler des Mars Science Laboratory, das 2009 auf die Reise zum Mars befördert werden soll.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Methane and related trace species on Mars: Origin, loss, implications for life and habitability. Von Sushil K. Atreya, Paul R. Mahaffy und Ah-San Wong in: Planetary and Space Science, Bd. 55, S. 358, 2007

Titan's methane cycle. Von Sushil K. Atreya in: Planetary and Space Science, Bd. 54, S. 1177, 2006

A sensitive search for SO_2 in the Martian atmosphere: Implications for seepage and origin of methane. Von Vladimir A. Krasnopolsky in: Icarus, Bd. 178, S. 487, 2005

Detection of methane in the atmosphere of Mars. Von Vittorio Formisano et al. in: Science, Bd. 306, S. 1758, 2004

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/874880.

DER TENNISBALL

Schnelles Spiel mit Filz und Gummi

Was Tennisstars über das Netz feuern, ist ein kleines Meisterwerk der Technik.

Von Mark Fischetti

Weltweit laufen jährlich 240 Millionen Tennisbälle vom Band – und einer gleicht dem anderen. Oder besser gesagt: Jeder erfüllt die vom Internationalen Tennisverband bezüglich Verformbarkeit und Aufpralleigenschaften vorgeschriebenen Grenzwerte. Das ist keineswegs selbstverständlich, schließlich bestehen diese Sportgeräte aus Naturgummi und Wolle, Rohstoffen also, deren Eigenschaften mit jeder Charge variieren.

Deshalb werden die Ausgangsmaterialien vielfach verarbeitet. Gummi vermengt man in Extrudern – Standardmaschinen der kunststoffverarbeitenden Industrie – mit bis zu elf Chemikalien. Dabei wird die Mischung ständig durchgeknetet und erwärmt. So entsteht eine homogene Grundmasse, die als Strang aus der Maschine austritt und in so genannte Pellets geschnitten wird.

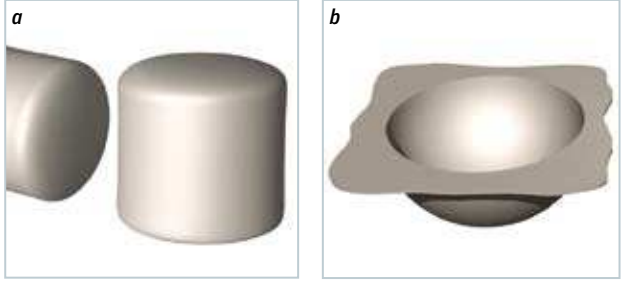
Diese Rohlinge presst man in Formen zu halbkugelförmigen Schalen und erhitzt diese auf 150 Grad Celsius. Die Gummimischung »vulkanisiert«, das heißt langkettige Kautschukmoleküle verbinden sich über Schwefelbrücken miteinander, die Masse wird elastisch. Die Ränder der Halbbälle werden poliert und mit Klebstoff benetzt. Nun bringt man die Hälften in Kontakt, erhitzt sie und erhält so den Ballkern.

Die strapazierfähige Hülle besteht aus einem dicht verwobenen Filz: Schafwolle wird dazu mit Nylon vermischt, zu einem Garn gesponnen und anschließend mit einem Baumwollfaden verwoben. Nach einer Imprägnierung kürzt man die Fasern, wobei sich ein Filz bildet. Dieser wird nun getrocknet. Dabei steht er unter Zugspannung, um die gewünschte Festigkeit zu erreichen. Auf der Rückseite beschichtet man das Gewebe anschließend mit einem Heißkleber. Nun werden zwei knochenförmige Stücke herausgeschnitten, auf den Ballkern geklebt und getrocknet. Dampf bauscht abschließend den Filz auf.

Trotz aller Einheitlichkeit gibt es natürlich Varianten. Über die Eigenschaften des Kerns sowie die Länge und Beschaffenheit des Oberflächenflors schneidern die Hersteller ihre Ware auf die Bedürfnisse der Spieler zu. Einen »haarigen« Ball erfasst der Schläger besser, das erleichtert beispielsweise Techniken wie den Topspin oder den Slice, die den Ball in Rotation versetzen. Allerdings erhöht dieses Design auch den Luftwiderstand und macht den Ball langsamer.

Turnierbälle weisen einen Innendruck von 1,6 bis 2,2 Bar auf, sie prallen deshalb auf hartem Untergrund rasch zurück und ermöglichen ein schnelles Spiel. Im Spitzentennis sind Fluggeschwindigkeiten von mehr als 200 Kilometern pro Stunde keine Seltenheit. Druckbälle fertigt man, indem die Kernhälften unter entsprechendem Überdruck zusammengefügt werden. Sie haben eine Gummiwandstärke von rund drei, drucklose Bälle von etwa vier Millimetern; letztere verhalten sich deshalb weniger elastisch. Allerdings entweicht die eingeschlossene Luft – auch Stickstoff wird verwendet – beim Druckball mit der Zeit und seine Spieleigenschaften ändern sich. Damit das nicht schon während der Lagerung geschieht, verpackt man solche Tennisbälle unter Überdruck, erkennbar an dem »Plopp« beim Öffnen der Verpackung.

Pellets aus homogen vermengtem Naturgummi und Chemikalien (a) werden in Formen (b) gepresst, vulkanisiert und die Ränder der Hälften mit Klebstoff benetzt (c).



Mark Fischetti ist Mitarbeiter der Redaktion von Scientific American.

Wussten Sie schon?

▶ **Die Globalisierung der Weltwirtschaft** macht auch vor dem Tennis nicht Halt. So vulkanisiert der britische Hersteller Dunlop Slazenger seine Ballkerne auf den Philippinen und verwendet dabei Tonerde aus den USA, Quartz aus Griechenland, Schwefel aus Südkorea, Zinkoxid aus Thailand und Magnesiumkarbonat aus Japan.

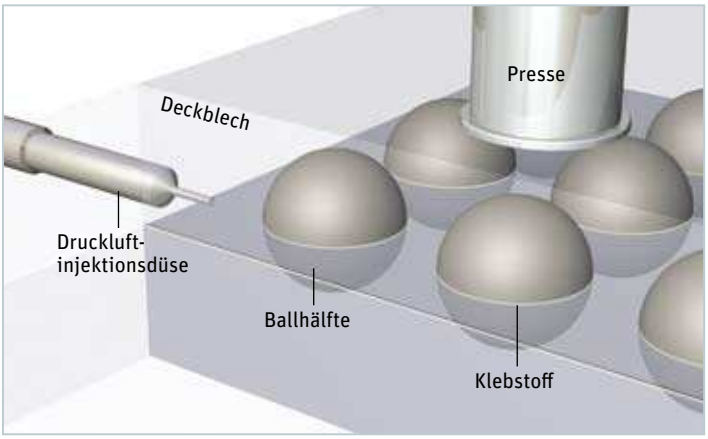
▶ **Schnelle Bälle eignen sich für »langsame« Plätze**, insbesondere für das Spiel auf Sandplätzen. Damit der Filz den Sand nicht so stark aufnimmt, wird er für diese Anwendung dichter gewebt. Meist bewegen sich die Sportler aber auf Hartplätzen und verwenden dementsprechend die Klasse »mittel«. Mit »langsamen« Bällen geht man aufs Gras, beispielsweise beim traditionellen Turnier in Wimbledon. Anfänger und Kinder trainieren mit langsamen »Methodik-Bällen« aus einem weichen Vollmaterial.

▶ **Als »Jeu de Paume«**, »Spiel mit der Handfläche«, entwickelten französische Mönche die Urform von Tennis, Badminton und ähnlichen Sportarten im 13. Jahrhundert. Die Bälle bestanden aus Leder oder Kork, die Spieler trugen meist Handschuhe. Im 15. Jahrhundert spielten die Wohlhabenden in »Ballhäusern« in weißer Kleidung, um sich von den dunklen Wänden besser abzuheben. Im 17. Jahrhundert wurde Tennis zum Volkssport, der vor allem im Freien ausgeübt wurde; damals entstanden in England auch die ersten, teilweise heute noch gültigen Regeln. Der gelbe Tennisball ist eine Entwicklung der letzten Jahrzehnte: Er hebt sich bei Fernsehübertragungen deutlicher vom Hintergrund des Platzes oder der Zuschauer ab als ein weißer.

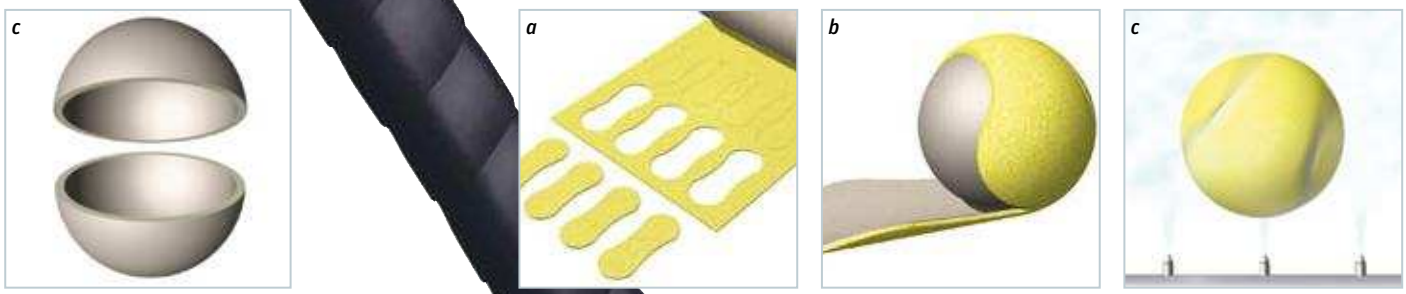
▶ **Bei einem Aufschlag** sind Ball und Schläger vier bis zehn Millisekunden in Kontakt. Diese Zeit variiert mit der Bespannungshärte des Schlägers, der Härte des Balls und natürlich der Schlagkraft.

▶ **Bis zu fünfzig Prozent der Tennisspieler** lernen im Lauf ihrer Sportlerkarriere das Krankheitsbild des so genannten Tennisarms kennen: Schmerzen an der Außenseite des Ellbogens. Ursache sind Entzündungen einer am Oberarmknochen ansetzenden gemeinsamen Sehne von Hand- und Fingerstreckmuskeln. Beim Ballkontakt werden diese angespannt, um das Handgelenk zu stabilisieren. Aufprall und Vibrationen ändern die Länge der Muskelfasern, belasten dabei die Sehne und können dort Mikroverletzungen zur Folge haben. Je unelastischer ein Ball ist, desto härter muss er geschlagen werden und das Erkrankungsrisiko wächst.

Eine Presse drückt die Ballhälften aneinander, Erwärmen sorgt für eine dichte Klebeverbindung. Soll der Innendruck des Balls über dem Atmosphärendruck liegen, wird vorher entsprechend Luft oder Stickstoff in die Kammer eingeblasen.



Aus Filz werden pro Ball zwei knochenförmige Stücke geschnitten (a), auf den Ball geklebt und getrocknet (b). Dampf bauscht den Filz dann auf (c).



ALLE GRAFIKEN: GEORGE RETSECK

Neue Wege aus der Qual

Dank einem besseren Verständnis der molekularen Schmerzsignale bieten sich nun neue Ansatzpunkte zur Entwicklung von Medikamenten – selbst gegen bislang oft schlecht bekämpfbare Formen von Schmerz.

Von Allan I. Basbaum und David Julius

Pochend, hämmernd, ziehend, juckend, brennend, bohrend, stechend, schneidend – Schmerz hat viele Gesichter. Die Gepeinigten wollen nur noch eines: dass er endlich aufhört.

Die beiden bekanntesten Schmerzmittel entstammen letztlich der traditionellen Volksmedizin. Sie nutzte jahrhundertelang den getrockneten Milchsaft des Schlafmohns mit seinen Opiaten wie Morphin, daneben unter anderem den Extrakt von Weidenrinde mit einem ähnlichen Wirkstoff wie in Aspirin. So hilfreich die modernen Versionen auch sein können, jede hat ihre Nachteile und Grenzen. Bei schwersten Schmerzen versagen Acetylsalicylsäure, der Aspirinwirkstoff, und andere Substanzen dieser Kategorie. Selbst Opiate, als allgemein stärkste Mittel, schlagen nicht immer an. Zudem können hier Gewöhnungseffekte auftreten, die immer höhere Dosen zur Schmerzlinderung erfordern. Dann drohen schwere Nebenwirkungen.

In den letzten zwanzig Jahren haben Neurowissenschaftler viel über die Signalübertragung bei Schmerz, die beteiligten Schaltkreise und Moleküle, herausgefunden. Daraus ergeben sich neue Ansätze, ihn mit weniger Nebenwirkungen besser zu bekämpfen. Erforscht werden derzeit sogar mehr solcher Strategien, als wir hier vorstellen können.

Im 17. Jahrhundert entwickelte der französische Philosoph, Mathematiker und Naturforscher René Descartes eine mechanistische Theorie zur Schmerzwahrnehmung. Ein Schlag oder Stich zog, so seine Vorstellung, im Prinzip an einem Nervenfaden, der im Gehirn eine Alarmglocke schrillen ließ. Und verbrannte man sich etwa einen Zeh, führten »sich schnell bewegende Feuerteilchen« zu Störungen, die »sich entlang von Nervenfasern fortpflanzen, bis sie schließlich das Gehirn erreichen«.

Descartes lag nicht einmal so weit daneben. Denn Schmerz – oder genauer: das als solcher empfundene Signal – beginnt in der Regel im Bereich des peripheren Nervensystems, etwa in der Haut oder den inneren Organen. Stößt man sich den Zeh oder fasst an eine heiße Herdplatte, werden spezialisierte Nervenzellen aktiviert. Ihre freien Nervenendigungen reagieren auf potenziell schädliche Reize, wie etwa hohen mechanischen Druck oder starke Hitze, aber auch auf Substanzen, die der Körper selbst bei Verletzungen und Entzündungen erzeugt.

Schmerz wird interpretiert

Die »Schmerzzellen« werden fachlich Nozizeptoren genannt (nach lateinisch *noxa*, Schaden, Verderben). Ihr Zellkörper liegt dicht am Rückenmark der Wirbelsäule und besitzt eine Art Stielchen mit zwei Ausläufern: Der eine detektiert im innervierten Gewebebereich entsprechende Reize, der andere erstreckt sich ins Rückenmark und macht dort Meldung (siehe Kasten S. 47). Biologischer ausgedrückt: Sprechen spezielle Detektormoleküle in den Nervenendigungen der Haut oder einem Organ an, so wird ein Nervenimpuls ausgelöst, der ins so genannte Hinterhorn des Rückenmarks läuft. Die dort endende Faser setzt Überträgerstoffe frei, die nachgeschaltete Nervenzellen im Rückenmark veranlassen, das Alarmsignal ins Gehirn weiterzuleiten. Erst hier wird es als Schmerz interpretiert. Dann entfährt uns vielleicht ein »Autsch«. Somit ist es eigentlich falsch, die Nozizeptoren – wie oft üblich – als Schmerzrezeptoren oder schmerzempfindliche Neuronen zu bezeichnen. Sie melden nur die Anwesenheit potenziell schädlicher Reize, fachlich als Noxen bezeichnet.

Nicht jeder Schmerz gibt gleich Anlass zur Sorge. So hat die akute Reaktion auf eine kleine Gewebsverletzung, ob Abschürfung, Verstauchung oder Brandfleck, eine Schutzfunktion. Sie lehrt, vorsichtiger zu sein, und hilft durch das Zurückzucken, weiter gehende Schäden zu vermeiden. Ein solcher Schmerz lässt gewöhnlich nach und verschwindet dann wieder völlig.

Eine hohe Belastung für Patient und auch Arzt stellen Schmerzformen dar, die langfristig anhalten und schwer zu behandeln sind. Vielfach schwinden sie nicht, weil ihr Auslöser – irgendein schädlicher Reiz – weiterbesteht. Bei Arthritis etwa ist das eine chronische Entzündung der Gelenke. Und die Qualen bei einem invasiv wachsenden Tumor werden großenteils von den resultierenden Gewebsverletzungen und Entzündungen geschürt.

In anderen Fällen ist anhaltender Schmerz neuropathischer Natur, rührt von einer Schädigung der Nervenzellen selbst her. Das kann im Zentralnervensystem – Gehirn und Rückenmark – sein, beispielsweise bei multipler Sklerose (hier greift das Immunsystem die Schutzisolierungen der Nervenfasern an), nach einem Hirnschlag oder einer Rückenmarksverletzung. Das Problem kann aber auch ursprünglich vom peripheren Nervensystem ausgehen (oft wird der Begriff Neuropathie darauf eingeengt). So verspüren manche Amputierte Schmerzen in Gliedmaßen, die längst nicht mehr existieren – so genannte Phantomschmerzen. Und nach einer Gürtelrose (ausgelöst durch ein Herpes-

Wenn Schmerzen anhalten, kann es passieren, dass Nervenzellen (symbolisiert durch die grün-roten Gebilde) immer empfindlicher werden. Gerade chronischer Schmerz ist oft schwer behandelbar.

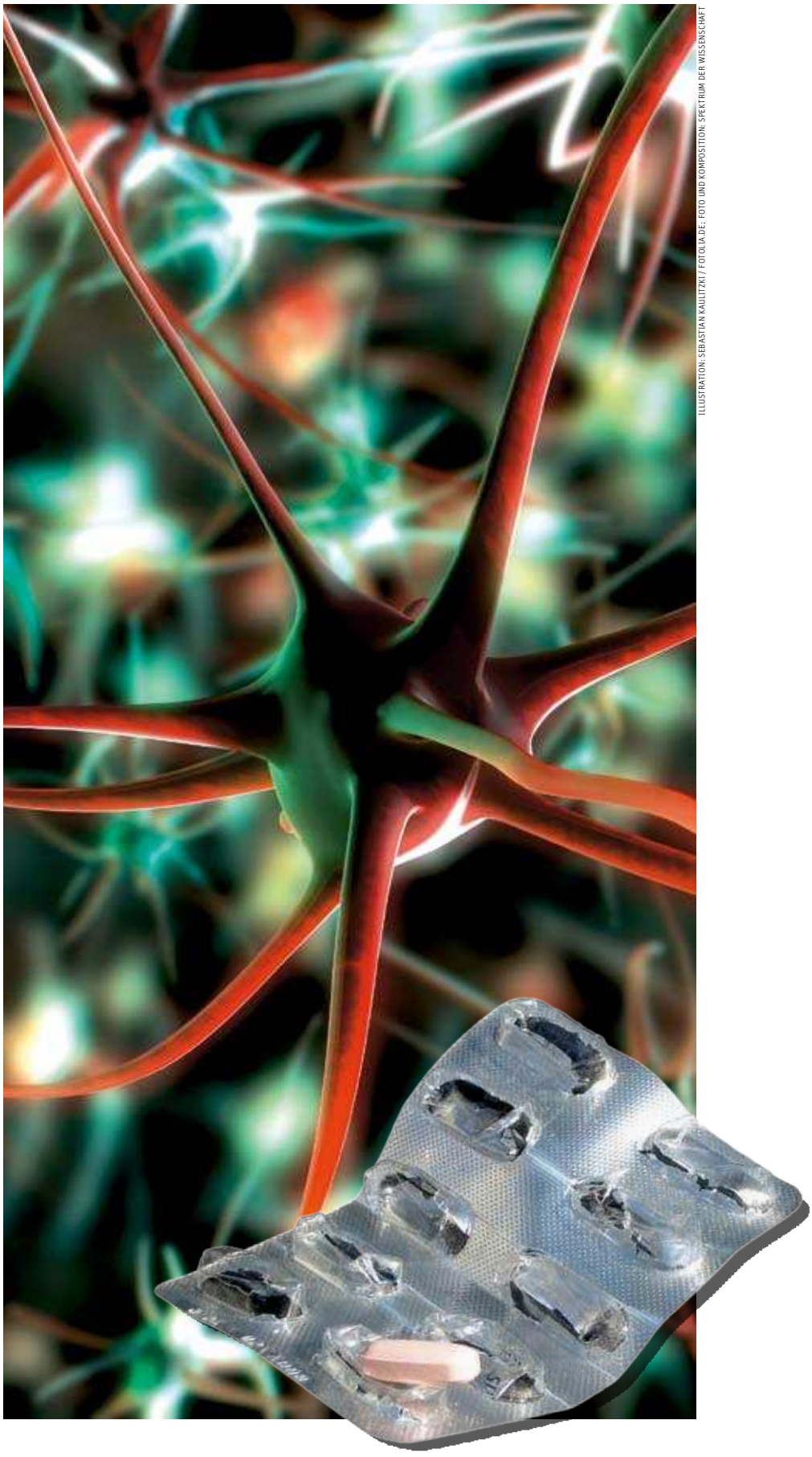


ILLUSTRATION: SEBASTIAN KAULITZKI / FOTOLIA.DE; FOTO UND KOMPOSITION: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Virus), brennt der Hautbereich manchmal noch Jahre nach dem Abklingen der Erkrankung. Mediziner sprechen von einer postherpetischen Neuralgie. Halten derartige Schmerzen an, so ist dies kein Symptom für ein fortbestehendes ursächliches Alarmsignal. Vielmehr handelt es sich dann um eine Erkrankung des schmerzleitenden und -verarbeitenden Systems selbst, die eine Behandlung durch den Spezialisten erfordern.

Menschen, die hartnäckiger Schmerz peinigt, entwickeln oft eine Überempfindlichkeit gegenüber schmerzhaften Reizen. Fachleute sprechen von Hyperalgesie. Im Extremfall – einer Allodynie – können bereits harmlose Reize wie etwa der sanfte Druck der Kleidung auf die Haut oder das Beugen eines Gelenks unerträglich werden.

Wie Forscher inzwischen wissen, beruht die erhöhte Empfindlichkeit, die Sensitivierung, auf molekularen oder strukturellen Veränderungen der Nervenzellen. In der Körperperipherie beispielsweise können entzündungsfördernde Moleküle die Schmerzsensoren dazu bringen, sensibler auf die vorhandenen Noxen zu reagieren – und schließlich sogar dazu, grundlos zu »feuern«. Eine Sensitivierung kann auch auf Veränderungen im Zentralnervensystem zurückgehen, die unter Umständen lange bestehen bleiben und »Schmerzbahnen« überaktiv machen. Zur verstärkten Weiterleitung von Schmerzsignalen kommt es dort beispielsweise, wenn die den Nozizeptoren unmittelbar nachgeschalteten Zellen mehr molekulare Antennen als sonst für die zu empfangende Botschaft tragen. Denkbar ist sogar eine neuronale Umverdrahtung oder der Verlust von Nervenzellen, die normalerweise die Signalgebung in der Schmerzbahn hemmen. ▷

▷ Welcher Prozess auch jeweils Schuld haben mag – wenn Schmerz anhält, kann er zu einer Sensitivierung führen und somit die Beschwerden verschärfen und verlängern. Auf der Jagd nach neuen Analgetika haben daher viele Forscher in erster Linie Mittel gegen Hyperalgesie und Allodynie im Visier. Doch bis dahin sollten Patienten eines beherzigen: Chronische Schmerzen stoisch zu ertragen, ist gerade das Verkehrte; vielmehr bedarf es einer aggressiven Behandlung mit bereits verfügbaren Möglichkeiten, um einer weiteren Sensitivierung Einhalt zu gebieten.

Große Anstrengungen galten und gelten der Entwicklung neuer Analgetika, die dort ansetzen, wo Schmerzsignale im typischen Fall ihren Anfang nehmen: außerhalb des zentralen Nervensystems. Manche der Moleküle, mit denen Nozizeptoren einen schädlichen Reiz detektieren, kommen auf kaum einem anderen Zelltyp vor. Mit ihrer Blockade ließe sich voraussichtlich der Start der neuronalen Signalkaskade verhindern, ohne andere physiologische Prozesse groß zu stören. Somit unterblieben problematische Nebenwirkungen.

Die heute populärsten Schmerzmittel sind die Acetylsalicylsäure und andere so genannte nichtsteroidale Entzündungshemmer, auch nichtsteroidale Antirheumatika genannt (NSAR). Sie entfalten ihre Wirkung hauptsächlich im Bereich des peripheren Nervensystems. Bei einer Gewebsverletzung geben eine Reihe von Zelltypen Prostaglandine ab. Diese körpereigenen Moleküle steigern, wenn sie auf die sensorischen Endigungen der Nozizeptoren einwirken, deren Empfindlichkeit. NSARs blockieren die Synthese von Prostaglandinen, indem sie die dafür zuständige Enzymfamilie der Cyclooxygenasen hemmen. Dies tun die herkömmlichen Mittel allerdings auch dort, wo sie es nicht sollten, und verursachen auf diese Weise oft Nebenwirkungen wie Durchfall, Magenschmerzen und -geschwüre. So hilfreich die Medikamente bei Alltagsbeschwerden sind – solche Komplikationen stehen einem Langzeiteinsatz im Weg und begrenzen die verabreichbaren Dosen.

Scharfe Reize zur Schmerzlinderung

Um die Probleme im Magen-Darm-Trakt zu reduzieren, entwickelten Pharmafirmen eine Familie von Wirkstoffen, die sich speziell gegen die Cyclooxygenase 2 (COX-2) richten. Weil diese Enzymvariante dort normalerweise nicht aktiv ist, sollten derartige Mittel nicht die gleichen Nebenwirkungen wie die traditionellen NSARs hervorrufen. Ob COX-2-Hemmer tatsächlich magenschonender sind, muss sich noch zeigen. Mittlerweile droht ihnen ein anderes Problem. Den Wirkstoff Rofecoxib (Handelsname Vioxx), der gegen rheumatische Gelenkschmerzen verschrieben wurde, nahm die Herstellerfirma vom Markt, als sich zeigte, dass er das Risiko für Herzinfarkt und Hirnschlag erhöht. Andere COX-2-Hemmer werden derzeit gründlich auf ihr Nebenwirkungsprofil hin untersucht.

Die Entdeckung von Molekülen, die fast nur auf den als Nozizeptoren arbeitenden Nervenzellen vorkommen, erweitert das Repertoire möglicher Angriffsziele und bietet die Chance, neue, selektive Wirkstoffe zu entwickeln. Für solche molekularen Antennen ist ebenfalls der Begriff Rezeptor gebräuchlich.

Besonders aussichtsreich erscheint hier der Capsaicin-Rezeptor, ein Ionenkanal in der Membran vieler Schmerzzellen. Anders als der Name suggeriert, spricht er nicht nur auf Capsaicin an, die scharfe Komponente in Chilischoten, sondern auch auf Wärme über 43 Grad Celsius sowie auf »Säure«, genauer auf Wasserstoff-Ionen (Protonen), die in entzündetem Gewebe in ungewöhnlich hoher Konzentration vorkommen. In Gegenwart solcher Reize öffnet sich der Kanal, sodass Natrium- und Calcium-Ionen aus dem Umfeld in die Schmerzzellen einströmen (siehe Kasten S. 48). Dadurch wird eine Signalkette angeworfen, deren Ergebnis dann in uns das brennende Gefühl hervorruft, das wir bei Hitze, Entzündungen oder auch beim Verzehr scharfer Speisen verspüren.

Substanzen, die den Rezeptor besetzen, ohne ihn anzuregen, sollten daher entzündlichen Schmerz dämpfen. Tatsächlich vermochten solche »Antagonisten« bei Labortieren schwerste Schmerzen zu lindern, die von Krebsmetastasen in Knochen ausgingen. In dem umliegenden zerstörten Gewebe ist das Milieu extrem sauer. Viele Pharmafirmen wetteifern derzeit darum, Medikamente auf dieser Basis zu entwickeln.

Die Möglichkeiten, am Capsaicin-Rezeptor anzusetzen, sind damit aber längst nicht erschöpft. Paradoxerweise wirkt unter bestimmten Umständen auch dessen gezielte Aktivierung schmerzlindernd. So werden Salben mit Capsaicin gegen die unangenehmen Empfin-

In Kürze

- Spezialisierte **schmerzempfindliche Nervenzellen** sprechen auf schädliche Reize an. Ihre Signale werden auf Nervenzellen des Rückenmarks umgeschaltet, die sie ans Gehirn weiterleiten – dieses wertet sie dann als Schmerz.
- Entlang der gesamten **Schmerzbahn** – von der Detektion der schädlichen Reize bis zur Kommunikation zwischen beteiligten Zellen – spielen jeweils unterschiedliche Moleküle eine Rolle. Sie bieten Ansatzpunkte für die Entwicklung neuer Wirkstoffe, die Schmerz vielleicht mit **weniger Nebenwirkungen** und besser bekämpfen als heute verfügbare Medikamente.

dungen beim Heilen von Operationswunden und bei Nervenschädigungen durch Diabetes, Herpes oder den Aidserreger HIV verschrieben: Wie die Mittel das Jucken, Stechen und Brennen dabei lindern, ist im Detail noch unklar. Niedrige, aber über längere Zeit verabreichte Dosen machen den Rezeptor vielleicht unempfindlicher gegen sonst wirksame Reize. Möglicherweise kommen die Sensorzellen auch nicht mehr mit der Bereitstellung ihrer Neurotransmitter nach, die sie als Botenstoffe an den Schaltstellen im Rückenmark ausschütten.

Ein weiteres Molekül an den freien Endigungen der Sensorzellen ist ebenfalls als Angriffsziel von Interesse. Alle Neuronen besitzen zumindest einen Typ Natriumkanal, der seine Schleusen öffnet, wenn sich die elektrische Spannung zwischen Innen- und Außenseite der Zellmembran in bestimmter Weise ändert. Durch den Einstrom von Natrium-Ionen entstehen die Nervenimpulse, die sich rasch über eine Nervenfaser fortpflanzen. Lokalanästhetika, die diese Kanäle zeitweise lahmlegen, werden gegen eine Vielzahl von Schmerzen eingesetzt, häufig auch bei Zahnbehandlungen. Doch sie sind eben nur lokal anwendbar. Denn Natriumkanäle im gesamten Nervensystem zu blockieren kann tödlich sein.

Zauberkugeln des Freischütz

Nun gibt es jedoch auf Schmerzzellen einen Typ spannungsgesteuerter Natriumkanäle, der nicht in Gehirn und Rückenmark vorkommt. Selektive »Blocker« dieses so genannten TTX-resistenten Typs sollten sich ohne schädliche Nebenwirkungen systemisch – also im ganzen Körper – anwenden lassen. Studien deuten überdies darauf hin, dass solche Wirkstoffe auch gut die überschießende Aktivität verletzter peripherer Nerven dämpfen könnten und somit manche neuropathischen Schmerzen lindern dürften. Leider ist es der pharmazeutischen Industrie bisher nicht gelungen, einen Arzneistoff zu entwickeln, der ausschließlich diese Kanäle blockiert – unter anderem, weil sie zu sehr der überall im Nervensystem vorkommenden TTX-empfindlichen Variante ähneln.

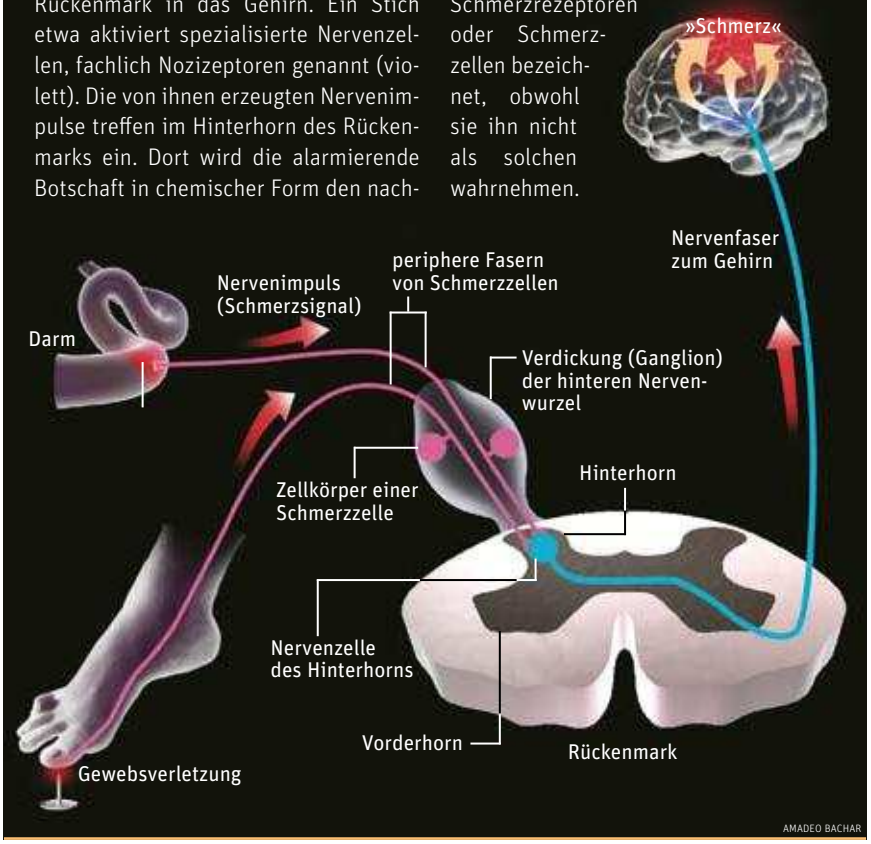
Vielleicht kann aber ein recht neuer Trick verhindern, dass die problematischen Kanäle überhaupt gebildet werden: Bei der Methode der RNA-Interferenz werden in die Zellen ganz kurze RNA-Moleküle eingeschleust, die sich an die Abschrift des Gens für den Bau eines unerwünschten Proteins anlagern und so deren Zerstörung einleiten (das Kürzel RNA steht für Ribonucleinsäure). Mit diesem Verfahren versucht man derzeit, Patienten mit bestimmten krankhaften Netzhautveränderungen zu behandeln. Doch RNA-Interferenz in ein Werkzeug gegen Schmerz umzumünzen, stellt eine zusätzliche Herausforderung dar. Denn um die RNA-Schnipsel in die richtigen Zellen zu bringen, bedarf es wahrscheinlich – ähnlich wie bei der Gentherapie – Viren als Vehikel, was Sicherheitsbedenken aufwirft. Ob ein solcher schmerztherapeutischer Ansatz praktikabel ist, muss die Zeit zeigen; bis dahin bleibt er eine interessante Option.

Einmal angenommen, es gelänge tatsächlich, Analgetika zu entwickeln, die wie die Zauberkugeln des Freischütz ganz genau ins Ziel treffen – die gezielt und wirksam eines der kritischen Moleküle auf Schmerzzellen außer Gefecht setzen. Würde das die Gepeinigten wirklich von hartnäckigen Schmerzen befreien? Wohl nicht. Denn es dürfte nicht reichen, nur eine Eintrittspforte zur Schmerzbahn zu schließen.

Eine solche Pforte ist der molekulare Rezeptor für das »Mini-Protein« Bradykinin: Es wird bei peripheren Entzündungen erzeugt und reizt Schmerzzellen sehr stark. Ein Wirkstoff, der den Rezeptor blockiert, würde sicherlich diesen Aktivierungsweg versperren. Doch die Nervenzellen würden weiterhin auf andere Substanzen ansprechen, die der Körper bei Verletzungen oder Entzündungen bildet, etwa Protonen und Prostaglandine. Und was eine Blockade des Capsaicin-Rezeptors anbelangt, so dürfte die nicht einmal jeglichen von Protonen ausgelösten Schmerz lindern. Denn diese Ionen aktivieren unter bestimmten Bedingungen auch einen anderen Typ ▷

Wer spürt den Schmerz?

Die so genannte Schmerzbahn (hier vereinfacht dargestellt) verläuft jeweils von der Peripherie des Körpers – der Haut und anderen Geweben außerhalb des Zentralnervensystems – über das Rückenmark in das Gehirn. Ein Stich etwa aktiviert spezialisierte Nervenzellen, fachlich Nozizeptoren genannt (violett). Die von ihnen erzeugten Nervenimpulse treffen im Hinterhorn des Rückenmarks ein. Dort wird die alarmierende Botschaft in chemischer Form den nachgeschalteten Nervenzellen (blau) übermittelt. Diese wiederum leiten die Nachricht an das Gehirn weiter, das sie erst als Schmerz interpretiert. Vereinfachend werden jedoch die Nozizeptoren als Schmerzrezeptoren oder Schmerzzellen bezeichnet, obwohl sie ihn nicht als solchen wahrnehmen.



▷ von Detektoren auf den Schmerzzellen: nämlich »säuresensitive Ionenkanäle« (kurz ASICs, nach dem englischen Begriff dafür). Einen Ausweg böte ein Cocktail von Hemmstoffen, der auf mehrere Schmerzmechanismen vor Ort zielt.

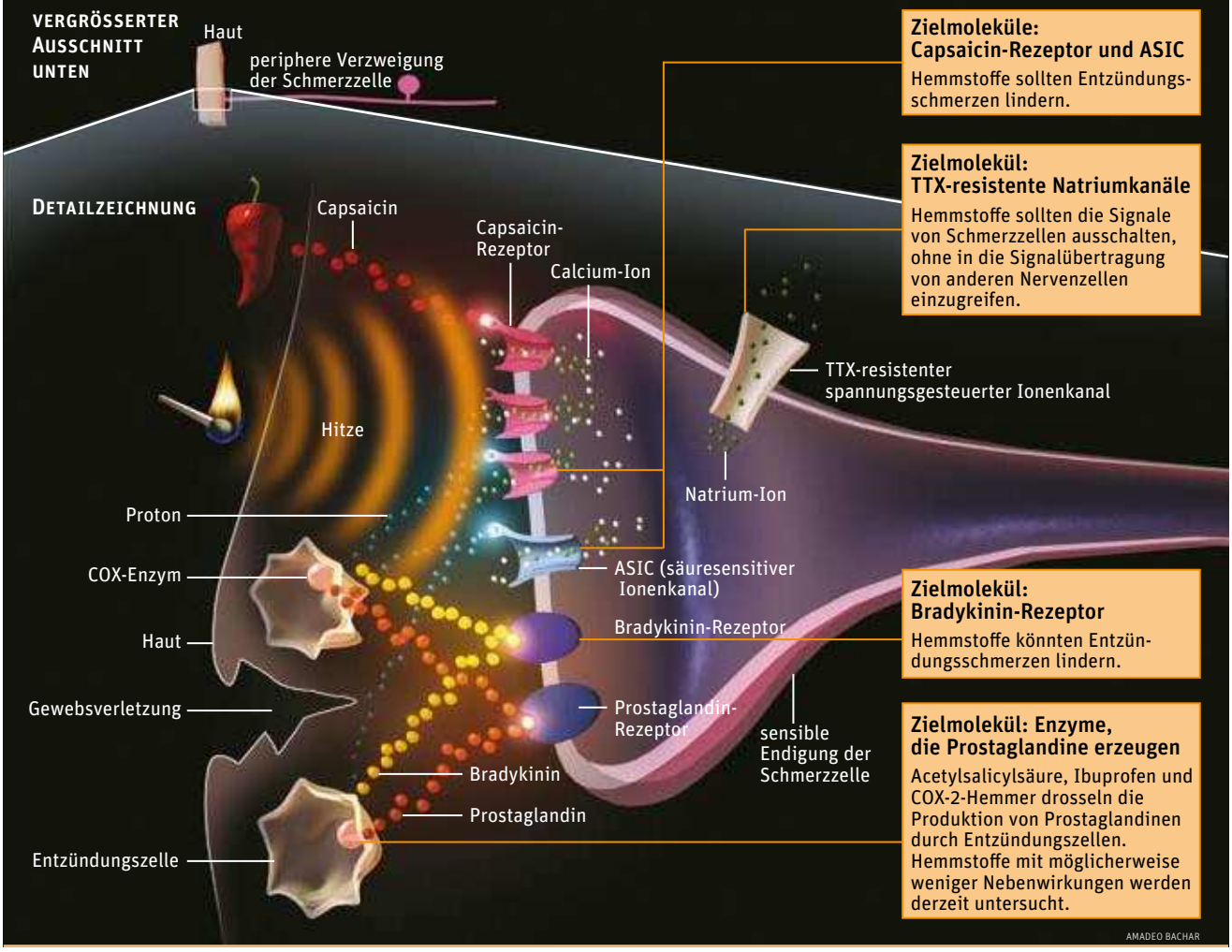
Alternativ ließen sich aber auch Moleküle im Bereich der ersten Synapse (Umschaltstelle) der Schmerzbahn anvisieren. Das würde die Nozizeptoren daran hindern, ihre Signale an ein Neuron des Rückenmarks zu übermitteln – unabhängig davon, durch welche Reize diese ursprünglich ausgelöst wurden. Unter anderem dort setzen auch Opiate wie Morphin an. Indem sie spezielle Hemmrezeptoren seitlich der Synapse der Schmerzzellen im Rückenmark aktivieren, blockieren sie die Abgabe von Neurotransmittern, die sonst das Signal übermitteln (siehe Kasten S. 50). Gleichzeitig setzen sie die Ansprechbarkeit der Empfängerneuronen im Hinterhorn herab. Weil Opiate wie gewünscht im Rückenmark ihre Wirkung entfalten, sollten sie theoretisch alle Arten von Schmerz dämpfen. Praktisch helfen sie jedoch gewöhnlich am besten gegen entzündungsbedingte Formen.

Leider kommen Opioid-Rezeptoren auf Nervenzellen im ganzen Körper vor, darunter im Gehirn und Magen-Darm-Trakt. Das erklärt auch die breite Palette unerwünschter Nebenwirkungen von Morphin und seinen Verwandten, wie etwa schwere Verstopfung und Atemlähmung. Derartige Komplikationen schränken den Einsatz hoher Dosen ein. Hinzu kommt, dass viele Ärzte nur zögerlich

Zielmoleküle an peripheren Nerven

Die freien Endigungen der Schmerzzellen, die Haut und innere Organe innervieren, tragen spezielle Detektoren für schädliche Reize. Diese molekularen Rezeptoren sprechen beispielsweise auf fremde chemische Substanzen wie das Capsaicin aus der Chilischote an, ebenso auf starke Hitze, aber auch auf körpereigene Substanzen, wie Entzündungszellen sie nach Gewebeschäden abgeben.

Manche der Detektoren lassen auf den Reiz hin Natrium- oder auch Calcium-Ionen in die Zellen einströmen, andere geben auf ihrer Zellinnenseite Alarm. Dadurch aktivierte Schmerzzellen erzeugen Signale und können, wenn das öfter passiert, sogar gegenüber harmlosen Reizen empfindlich werden. Damit sich die Signale längs der Nervenfaser fortpflanzen können, müssen auch so genannte spannungsgesteuerte Ionenkanäle aktiv werden. Diese bieten sich ebenso wie die Detektormoleküle als potenzielle Angriffsziele bei der Medikamentenentwicklung an (siehe die Informationen in den vier Kästchen). Zur besseren Übersicht sind nur einige von ihnen erwähnt.



Opiate verschreiben aus Sorge, ihre Patienten könnten davon psychisch abhängig werden. Sucht tritt indes nur selten bei einer sorgfältigen Schmerztherapie auf. Um einige der Nebenwirkungen zu vermeiden, aber auch aus anderen Gründen werden Opiate häufig intrathekal, also gleich in den flüssigkeitsgefüllten Raum um das Rückenmark verabreicht. Bei chronischen Schmerzen kann der Patient sie über eine implantierbare Pumpe erhalten, zur akuten Schmerzbehandlung nach einer Operation jedoch per Spritze.

Alternativen zu Opiaten gibt es inzwischen. So blockieren Wirkstoffe, die Calciumkanäle hemmen, auch die Freisetzung von Neurotransmittern an der ersten Schaltstelle im Rückenmark. Ein Beispiel ist das Anti-Epileptikum Gabapentin (Handelsname Neurontin); es lindert zugleich neuropathische Schmerzen, wohl weil es sich an ein bestimmtes Modul von Calciumkanälen heftet.

Ein relativ neuer Arzneistoff namens Ziconotid (Handelsname Prialt) aus dem Gift einer südpazifischen Meeresschnecke hemmt Calciumkanäle des so genannten N-Typs. Diese Sorte kommt genau wie die Opioid-Rezeptoren überall im Nervensystem vor. Würde man Ziconotid systemisch einsetzen, käme es zu einem drastischen Abfall des Blutdrucks. Deshalb wird es ebenfalls nur intrathekal verabreicht. Da es von dort auch das Gehirn erreicht, treten unerfreuliche Nebenwirkungen wie Schwindel, Übelkeit, Kopfweh und Verwirrung auf. Ziconotid ist deshalb Tumorpatienten im Spätstadium vorbehalten, wenn alle anderen Mittel versagen (siehe Spektrum der Wissenschaft 5/2006, S. 67).

Empfänglich für Marihuana

In jüngster Zeit wurden Substanzen klinisch getestet, die auf Cannabinoid-Rezeptoren wirken – die gleichen, die auch auf Marihuana ansprechen. Diese Arzneistoffe scheinen Schmerz zu lindern, indem sie an mehreren Stellen im Körper eingreifen. Unter anderem stören sie die Kommunikation an der Schaltstelle im Rückenmark und zügeln gleichzeitig Entzündungszellen.

Manche Forscher konzentrieren sich auf die Blockade von Nervenzellen des Rückenmarks. Diese sollen daran gehindert werden, auf die von den Schmerzzellen freigesetzten Neurotransmitter zu antworten – insbesondere auf Glutamat als Hauptüberträger der Schmerzbotschaft. Die Aminosäure aktiviert diverse Rezeptoren in der Hinterhornregion des Rückenmarks – darunter so genannte NMDA-Rezeptoren, die an der Sensitivierung im Zentralnervensystem beteiligt und daher ein logischer molekularer Ansatzpunkt für neue Analgetika sind.

Jede Nervenzelle im Körper trägt irgendeine Variante dieser Rezeptoren. Die Hemmung aller Typen hätte Erinnerungsverlust, Anfälle, Lähmungen und andere Katastrophen zur Folge. Daher versuchen Wissenschaftler speziell die Varianten zu bremsen, die überwiegend im Hinterhhorn vorkommen. Dazu gehören die Rezeptoren mit einer so genannten NR2B-Untereinheit. Dort andockende Wirkstoffe erwiesen sich im Tierversuch als viel versprechend. So waren Mäuse, die zuvor einen NR2B-Inhibitor direkt in die Rückenmarksflüssigkeit gespritzt bekamen, weniger schmerzempfindlich als unbehandelte Tiere. Zudem machte der Hemmstoff eine Allodynie bei Mäusen mit einer peripheren Nervenverletzung wieder rückgängig.

Eine Reihe von Schmerzzellen nutzt als Botenstoffe auch Mini-Proteine (korrekter Peptide genannt), wie etwa »Substanz P« und das »Calcitonin-Gen-verwandte Peptid« (CGRP, nach dem englischen Begriff). Diese aktivieren nachgeschaltete Neuronen im Rückenmark, indem sie an bestimmte Rezeptoren andocken. Hier die Interaktion zu unterbinden, sollte eigentlich hilfreich sein.

Leider hat aber die selektive Blockade des Ziels von Substanz P – es handelt sich um den Neurokinin-1-Rezeptor – in klinischen Studien versagt. Vielleicht reicht es nicht aus, nur ihn auszuschalten. Ob ein Eingriff in die Signalübertragung durch CGRP im Rückenmark wirklich Schmerzen ausschalten kann, ist noch nicht bekannt. Derzeit entwickelt die Pharmaindustrie zumindest Wirkstoffe, welche die Bindung von CGRP an Blutgefäße der Hirnoberfläche verhindern sollen – in der Hoffnung, die Qualen bei Migräne zu lindern.

Schlagen alle Versuche der Schmerzbekämpfung fehl, ist zu erwägen, den Überbringer der Botschaft selbst zu töten. Doch wie erwähnt, kann die Durchtrennung von Nervenfasern genau zum Gegenteil führen und noch hartnäckigere Beschwerden auslösen. Früher war die so genannte Cordotomie, bei der zum Gehirn führende Bahnen des Rückenmarks gekappt werden, ein gängiges Mittel ▷

wichtige**online**adressen

Datenauswertung und Messtechnik
Sensoren, Verstärker, USB-Messkarten
Messprogramme, Auftragsmessungen
Instrumentierung von Prüfständen
www.alles-messen.de

DOK – Düsseldorfer Optik-Kontor
Kontaktlinsen online bestellen
www.dok.de

Kernmechanik – Optimiertes Modell: Kernspin + Dipolmomente
www.kernmechanik.de

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 83,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing
Susanne Förster
Telefon 0211 61 88-563
E-Mail: s.foerster@vhb.de

▷ zur Schmerzbekämpfung. Doch heute bleibt sie Krebspatienten im Endstadium vorbehalten, sofern alles andere versagt. Die Methode ist deshalb so problematisch, weil der Chirurg dabei nicht nur die »Schmerzkabel«, sondern auch andere Leitungsbahnen kappt.

Daher weckt nun ein im Tierexperiment getesteter Ansatz erhebliches Interesse: Er zielt auf eine Untergruppe von Rückenmarksneuronen, die Input von Schmerzzellen erhält. Dazu wurde das Zellgift Saporin an Substanz P gekoppelt. Die Zielzelle nimmt den an ihr andockenden Neurotransmitter auf – und mit ihm das sich abspaltende Gift. Weil das trojanische Pferd nur in Zellen mit einem Neurokinin-1-Rezeptor gelangen kann, sollten sich die Nebenwirkungen in Grenzen halten.

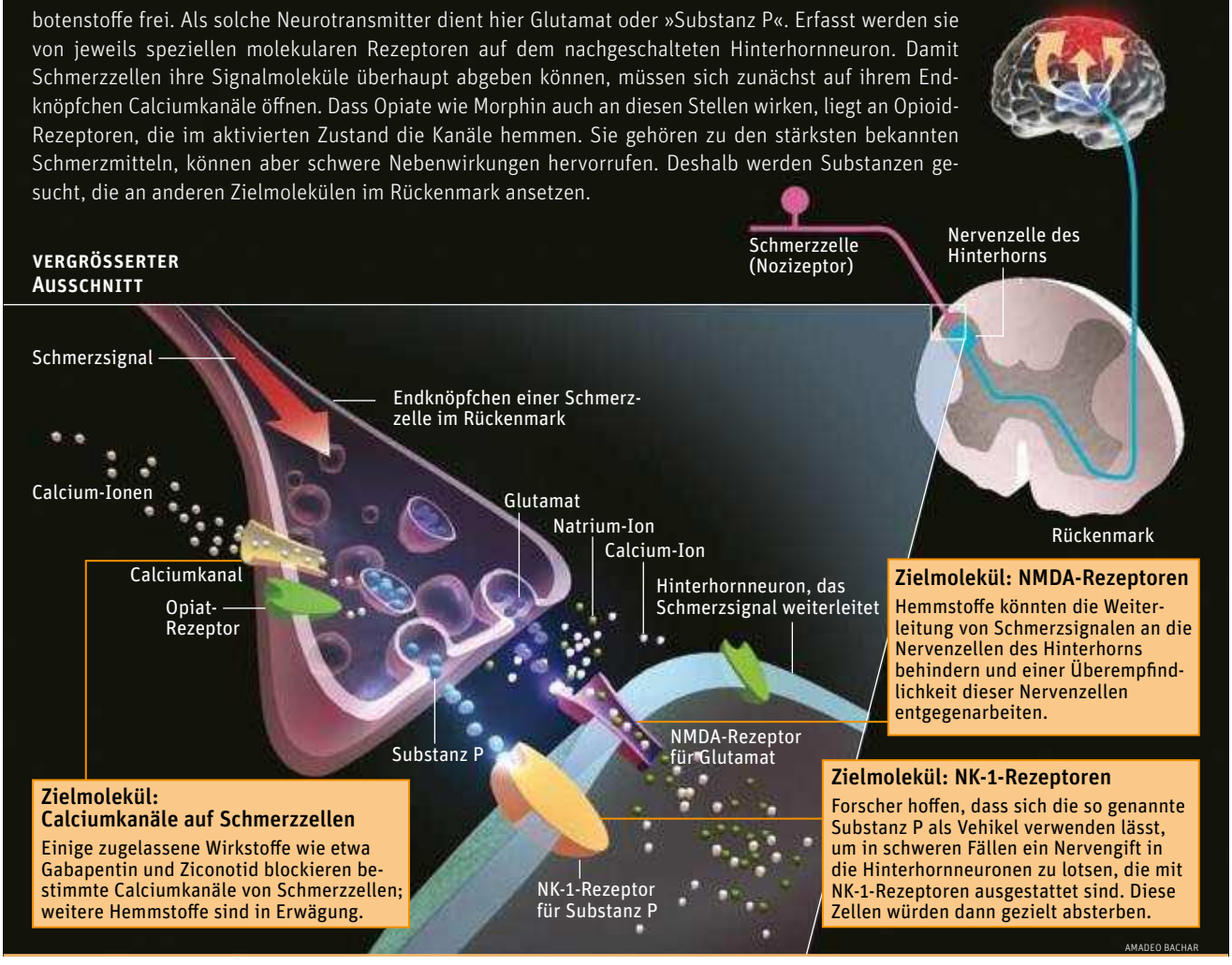
Neuronen des Rückenmarks zu eliminieren, ob nun chirurgisch oder chemisch, sollte allerdings immer als letzter Ausweg gelten: Weil Nervenfasern des Zentralnervensystems nicht wieder nachwachsen, sind die Veränderungen – zum Besseren oder Schlechteren – von Dauer. Das gilt nicht für das periphere Nervensystem, wo durchtrennte Fasern sich regenerieren können. Im Idealfall ließen sich hier, unter anderem durch hohe Dosen Capsaicin, die »Schmerzfühler« der Nozizeptoren »zurückstutzen«. Später würden sie wieder in ihr zuvor innerviertes Gewebe einwachsen und eine normale Schmerzwahrnehmung erlauben.

Neben Neuronen mögen auch die Nähr- und Stützzellen im Zentralnervensystem therapeutische Zielscheiben bieten. Diese so genannten Gliazellen treten, wie einige Studien zeigen, auch bei einer Schädigung peripherer Nerven auf den Plan: Sie wandern in den Bereich des Hinterhorns, der von den verletzten äußeren Nerven Input erhält; hier schütten sie einen Cocktail von Substanzen aus, der Nozizeptoren dazu antreibt, weiterhin Neurotransmitter abzugeben und dadurch ein Schmerzsignal aufrechtzuerhalten. Einige Komponenten, darunter so genannte Wachstumsfaktoren und Cytokine, machen zugleich die nachgeschalteten Neuronen des Hinterhorns übererregbar. Ein Abblocken sollte helfen, die übermäßige Empfindlichkeit zu dämpfen. Verschiedene Forschergruppen versuchen derzeit die Moleküle zu identifizieren, die nach einer Nervenverletzung Gliazellen anlocken und aktivieren. Ihr Ziel ist letztlich, Hemmstoffe dagegen zu finden.

Interessanterweise geben aktivierte Gliazellen im Rückenmark auch Prostaglandine ab. Diese Substanzen blockieren dort auf Neuronen des Hinterhorns eine Schmerzbremse: den Rezeptor für

Zielmoleküle im Rückenmark

An den Relaisstationen im Hinterhorn des Rückenmarks setzen aktive Schmerzzellen chemische Nervenbotenstoffe frei. Als solche Neurotransmitter dient hier Glutamat oder »Substanz P«. Erfasst werden sie von jeweils speziellen molekularen Rezeptoren auf dem nachgeschalteten Hinterhornneuron. Damit Schmerzzellen ihre Signalmoleküle überhaupt abgeben können, müssen sich zunächst auf ihrem Endknöpfchen Calciumkanäle öffnen. Dass Opiate wie Morphin auch an diesen Stellen wirken, liegt an Opioid-Rezeptoren, die im aktivierten Zustand die Kanäle hemmen. Sie gehören zu den stärksten bekannten Schmerzmitteln, können aber schwere Nebenwirkungen hervorrufen. Deshalb werden Substanzen gesucht, die an anderen Zielmolekülen im Rückenmark ansetzen.



Neuartige Schmerzmittel in der Entwicklung

Aufgelistet sind einige Substanzen mit neuartigem Wirkmechanismus, die gerade klinisch, also an Menschen, geprüft werden. Neue Varianten bereits bekannter Arzneistoffe – etwa Opiate und COX-Hemmer – bleiben hier außen vor. Ein potenzielles Medikament durchläuft drei Stadien klinischer Tests: Phase 1 konzentriert sich auf die Sicherheit, Phase 2 umfasst frühe Studien zur Wirksamkeit und Phase 3 involviert eine größere Zahl von Patienten.

Substanz (Entwickler)	Wirkmechanismus	klinisches Stadium	Unternehmen, die verwandte Wirkstoffe untersuchen
AMG-517 (Amgen)	blockiert den Capsaicin-Rezeptor	Phase 1	GlaxoSmithKline; Neurogen
EVT-101 (Evotec)	blockiert NMDA-Rezeptoren, die eine Untereinheit namens NR2B enthalten	Phase 2 geplant	Roche; MSD SHARP & DOHME GMBH
Icatibant (Sanofi-Aventis)	blockiert einen Bradykinin-Rezeptor	Phase 2	MSD SHARP & DOHME GMBH
NGX-4010 (NeurogesX)	überstimuliert den Capsaicin-Rezeptor	Phase 3	–
NMED-160 (Neuromed Pharmaceuticals)	blockiert Calciumkanäle vom N-Typ	Phase 2	–
Ralfinamid (Newron Pharmaceuticals)	blockiert Natriumkanäle	Phase 2	–
RN624 (Rinat Neuroscience)	hindert den Nervenwachstumsfaktor daran, Schmerzzellen zu reizen	Phase 2	Amgen
SAB-378 (Novartis)	aktiviert einen Cannabinoid-Rezeptor	Phase 2	GW Pharmaceuticals; GlaxoSmithKline

QUELLE: FRANZ F. HEFTI, RINAT NEUROSCIENCE CORPORATION

den dämpfenden Neurotransmitter Glycin. Denkbar ist daher, dass NSARs auch COX-Enzyme der Gliazellen hemmen und so deren Synthese von Prostaglandinen unterbinden können. In diesem Fall dürften die Nebenwirkungen solcher Pharmaka zu minimieren sein – durch ein direktes Verabreichen in die Rückenmarksflüssigkeit. Ebenso könnte ein Arzneistoff, der die Aktivität des bremsenden Glycin-Rezeptors verstärkt, ein Weiterleiten von Schmerzsignalen an das Gehirn eindämmen helfen.

Ein Element von Leere

Was wir hier vorgestellt haben, ist nur eine Auswahl der derzeit verfolgten experimentellen Ansätze. Alle haben sich bereits im Tierversuch als viel versprechend erwiesen. Die interessantesten davon beeinträchtigen eine normale Empfindung nicht, mindern aber die typische Überempfindlichkeit bei schwer behandelbaren entzündlichen oder neuropathischen Schmerzen, ohne inakzeptable Nebenwirkungen. Doch werden solche Therapien Patienten helfen? Und wird es gegen jegliche Art von Schmerz ein Rezept geben? Das ist noch offen.

Für manche Schmerzen, die sich bislang kaum medikamentös behandeln lassen, sollten auch verhaltenstherapeutische Ansätze weiter erforscht werden – insbesondere bei solchen quälenden Leiden wie der Fibromyalgie und dem Reizdarmsyndrom, für die schlüssig belegbare organische Ursachen fehlen.

Beispielsweise zeigten Forscher der kanadischen McGill-Universität in Montreal vor etwa zehn Jahren, dass sich unter Hypnose die Schmerzwahrnehmung zusammen mit der Hirnaktivität zu verändern vermag. Bei dem Experiment wurde Freiwilligen in Hypnose suggeriert, das heiße Wasser, in das sie ihre Hände zu tauchen hatten, sei entweder mehr oder weniger angenehm, als es der tatsächlichen Temperatur entsprach. Gleichzeitig machte ein bildgebendes Verfahren die Hirnaktivität sichtbar.

Ergebnis: In beiden Situationen war die somatosensorische Hirnrinde, die auf die Intensität physikalischer Reize wie Wärme reagiert, gleich stark aktiv. Eine andere Hirnregion jedoch, in der so genannten cingulären Windung, war aktiver, wenn die Versuchspersonen glaubten, der Reiz sei unangenehmer als in Wirklichkeit. Anscheinend hatte die Hypnose ihre Art der Wahrnehmung verändert. Wüssten wir mehr darüber, wie das Gehirn Schmerzerfahrungen moduliert, ließen sich vielleicht bessere kognitive Therapien entwickeln, um Schmerzempfindungen abzuschwächen.

Die amerikanische Dichterin Emily Dickinson (1830–1886) sinnierte oft über den Schmerz. In einem ihrer Gedichte schrieb sie:

Schmerz hat ein Element von Leere;
Er kann sich nicht erinnern
Wann er begann, oder ob es
Einen Tag gab, an dem er nicht war.
Er hat keine Zukunft außer sich selbst.

Bleibt nur zu hoffen, dass die weitere Erforschung der Schmerzwahrnehmung zu sicheren und wirksamen Behandlungsmethoden führt, die den Lauf des Schmerzes umkehren – zurück in die Vergangenheit, als es ihn nicht gab. ◁

Allan I. Basbaum (oben) ist Professor und Leiter der Abteilung für Anatomie der Universität von Kalifornien in San Francisco (U.C.S.F.). Promoviert hat er an der Universität von Pennsylvania in Philadelphia auf dem Gebiet der Neurowissenschaften. **David Julius**, Professor für zelluläre und molekulare Pharmakologie an der U.C.S.F, promovierte in Biochemie an der Universität von Kalifornien in Berkeley. Beide Forscher arbeiten oft zusammen, wenn sie Schmerzmechanismen untersuchen. Sie beraten auch Firmen, die neue Schmerztherapien entwickeln – darunter GlaxoSmithKline, Hydra Biosciences, NeurogesX und Rinat Neuroscience.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Emerging strategies for the treatment of neuropathic pain. J. N. Campell et al. (Hg.). IASP Press 2006

Immune cells and glial cell factors as pain modulators. S. B. McMahon et al. in: Experimental Neurobiology, Bd. 192, Nr. 2, S. 444, 2005

Molecular mechanisms of nociception. Von D. Julius und A. I. Basbaum in: Nature, Bd. 413, S. 203, September 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/872687.

ALLE FOTOS DES ARTIKELS: AGUST GUDMUNDSSON

Warum sind Vulkanausbrüche so selten?

Ein Vulkan bricht aus, wenn ein mit Magma gefüllter Bruch im Gestein – ein Gang – bis zur Erdoberfläche vordringt. Neuen Untersuchungen zufolge werden die meisten solchen Gänge jedoch auf dem Weg nach oben gestoppt; anderenfalls gäbe es viel mehr Eruptionen. Was ist der Grund dafür?

Von Agust Gudmundsson und Sonja L. Philipp

Nach aktuellen Schätzungen schwebt über 500 bis 600 Millionen Menschen das Damoklesschwert eines Vulkanausbruchs. Demnach sind etwa zehn Prozent der Menschheit durch aktive Feuerberge in ihrer näheren Umgebung bedroht – von der ökonomischen und sozialen Infrastruktur in den betreffenden Gebieten ganz abgesehen.

Das zeigt, wie wichtig es ist, drohende Vulkanausbrüche vorhersagen zu können. Nur dann lässt sich rechtzeitig Vorsorge treffen. Richtige Prognosen können aber nur dann gelingen, wenn wir das Verhalten der Feuerberge im Detail verstehen.

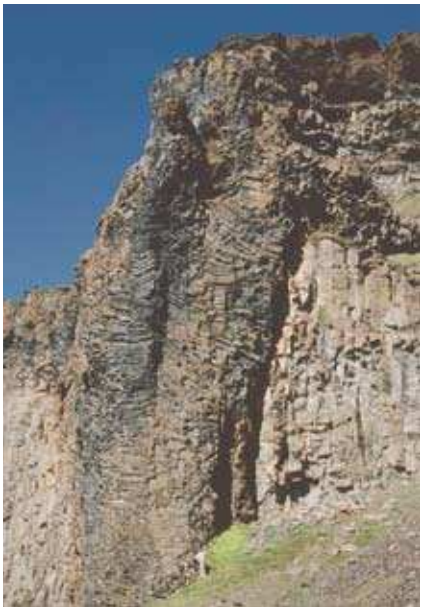
Ein Beispiel einer dicht bevölkerten Region in Europa, in der sich jederzeit eine Vulkankatastrophe ereignen kann, ist die Bucht von Neapel samt ihrer Umgebung. Mehrere Millionen Menschen leben hier in unmittelbarer Nähe von zwei großen, sehr gefährlichen Vulkanen: dem Vesuv und den Phlegräischen Feldern.

Bedrohliche »aktive« Feuerberge – das heißt solche, deren letzte Eruption weniger als 10 000 Jahre zurückliegt – gibt es aber auf allen Kontinenten. Jedes Jahr brechen etwa fünfzig bis sechzig von ihnen aus. Diese Zahl bezieht sich freilich nur auf Eruptionen oberhalb des Meeresspiegels, die als subaerisch bezeichnet werden. Die meiste vulkanische Aktivität – schätzungsweise achtzig Prozent – findet weit gehend unbemerkt auf dem Meeresboden statt, vor allem an mittelozeanischen Rücken.

Die Zahl von fünfzig bis sechzig Vulkanausbrüchen im Jahr mag viel erscheinen. Sie relativiert sich jedoch, wenn man bedenkt, dass es weltweit mindestens 1500 bis 1600 aktive große Vulkane gibt, die in kürzeren oder längeren Abständen immer wieder ausbrechen. Vermutlich noch einmal so viele scheinen zwar inaktiv, sind aber, da Feuerberge oft eine Lebensdauer von mehreren Millionen Jahren haben, nicht wirklich erloschen; es gab nur zufällig innerhalb der letzten 10 000 Jahre keine Eruption mehr oder sie wurde nicht entdeckt. Hinzu kommt eine unbekannte, aber sicherlich große Zahl von Vulkanen, die überhaupt nur ein einziges Mal Feuer speien.

Zu bedenken ist auch, dass unter großen Teilen der Erdoberfläche in der so genannten Asthenosphäre enorme Mengen geschmolzenen Gesteins lagern. Dieses Magma beschränkt sich also keinesfalls, wie von Laien oft angenommen, auf Kammern unter Vulkanen, sondern kommt fast überall in einer bestimmten Tiefe in der Erde vor. Wenn wir all das berücksichtigen, verwundert die Zahl von fünfzig bis sechzig jährlichen Erup- ▷

Hier stoppte vor 600 Jahren in Südwestisland durch einen Spalt aufsteigendes Magma nur fünf Meter unter dem Boden – an der Grenze zwischen einer Tuffschicht (beige) und einem Lavastrom (bläulich). So wurde im letzten Moment ein Vulkanausbruch verhindert. Viele »Gänge«, die von einer Magmakammer emporführen, bleiben wegen ungünstiger Spannungsverhältnisse stecken.



Im Gegensatz zu dem Gang auf dem Foto auf S. 52 hat dieser inzwischen durch Erosion freigelegte, acht Meter breite Schlot die Oberfläche erreicht und vor 6000 Jahren einen Ausbruch in Nordisland gespeist.

▷ tionen nicht mehr – im Gegenteil: Vor diesem Hintergrund überrascht es eher, dass Vulkanausbrüche nicht viel häufiger auftreten.

Das Erstaunen wächst noch, wenn man sich vor Augen hält, dass Unruheperioden in Vulkanen – Zeiträume, in denen Magma aufsteigt, der Boden anschwillt und Erdbeben auftreten – wesentlich häufiger sind als eigentliche Ausbrüche. Dies aber bedeutet nichts anderes, als dass in den meisten Fällen eine sich anbahnende Eruption schließlich doch nicht stattfindet. Selbst Unruheperioden, bei denen nachweislich Gesteinsschmelze durch Gänge gepresst wird, enden überwiegend nicht in einem Ausbruch.

Damit erhebt sich die Frage: Warum sind Vulkanausbrüche so selten? Die Antwort spielt eine entscheidende Rolle für die Vorhersage solcher Eruptionen und die Risikoabschätzung. Zugleich hat sie große Bedeutung für das allgemeine Verständnis, wie Vulkane funktionieren – naturgemäß eines der Hauptziele der Vulkanologie.

Eines ist klar: Damit ein Vulkanausbruch stattfindet, muss ein mit Magma gefüllter Riss, das heißt ein Gang, in der Erdkruste bis an die Oberfläche vordringen. Deshalb können wir unsere Frage konkreter formulieren: Warum enden so viele Gänge innerhalb der Erdkruste und warum schaffen es einige wenige dennoch, sich bis zur Erdoberfläche fortzusetzen? Welche Bedingungen müssen also erfüllt sein, damit Magma durch einen Bruch ins Freie gelangen kann?

Die Suche nach der Antwort führt uns in den Bereich eines neuen Spezialgebiets der Geowissenschaften: der Vulkantektonik. Diese Disziplin konzentriert sich auf die physikalischen Prozesse, die innerhalb von Vulkanen auftreten, und untersucht, wie sich diese in den Vorgängen an der Oberfläche widerspiegeln. Dabei strebt sie nach einem Verständnis des Geschehens auf der Basis der Materialeigenschaften unter Rückgriff auf Prinzipien der Mechanik sowie der Physik von Fluiden und Feststoffen.

Als fruchtbar haben sich in diesem Zusammenhang Konzepte aus der Materialwissenschaft erwiesen. Bedeutende Fortschritte brachte insbesondere der Vergleich von Vulkanen mit Verbundwerkstoffen. In diesen sind mehrere Materialien mit sehr unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften kombiniert. In ähnlicher Weise bestehen auch Vulkane oft aus vielerlei Gesteinsschichten sehr unterschiedlicher Härte, Elastizität und Bruchfestigkeit. Wenn man dies berücksichtigt, lassen sich viele Eigenarten der Feuerberge erklären – darunter auch, warum sie nur so selten ausbrechen.

Die Rolle der Magmakammer

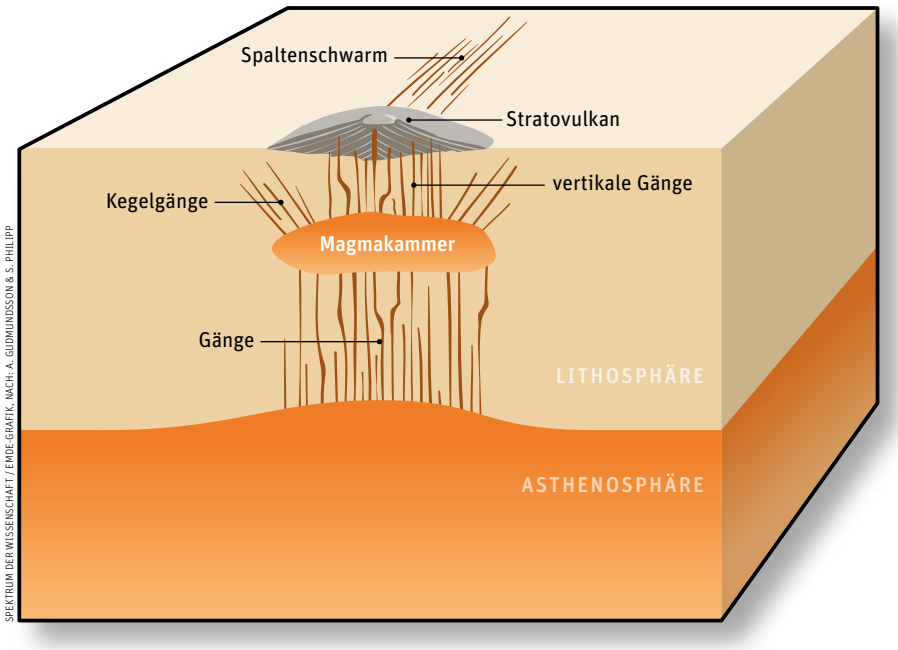
Die meisten Zentralvulkane, also solche mit einem charakteristischen Kegel, werden von Magma aus einer Kammer in der Erdkruste unter ihnen gespeist. Dort sammelt sich Gesteinsschmelze, die aus einer tieferen Quelle im Erdmantel aufgestiegen ist. Wenn der Druck in der Kammer zu groß wird, zerreißt deren Dach. Es bilden sich Spalten, durch die das Magma weiter nach oben gedrückt wird. Diejenigen Gänge, welche die Oberfläche erreichen, fungieren dann als Förderkanäle, durch die vulkanisches Material in die Umgebung austritt. Dort bildet sich der Zentralvulkan. Ohne Magmakammern in der Kruste würden keine solchen charakteristischen Kegelberge entstehen, und der Vulkanismus wäre wesentlich gleichmäßiger über die Erdoberfläche verteilt.

Die unterirdischen Magmareservoire, die sich in relativ geringen Tiefen von ein bis zehn Kilometern befinden, sammeln aber nicht nur Gesteinsschmelze aus dem Erdmantel, sondern trennen sie auch chemisch-mineralogisch auf. Vor allem eine bestimmte Fraktion steigt dann jeweils durch Gänge oder andere Förderkanäle weiter auf – bis zur Austrittsstelle an der Oberfläche, wo sich nach und nach der Vulkankegel bildet.

Die Bewegung der Schmelze in der Tiefe erzeugt Erdbeben sowie Landhebungen oder -senkungen. An diesen Signalen lässt sich erkennen, wo sich aktive Magmakammern befinden, und abschätzen, wie groß sie sind. Meist haben sie ein Volumen von 5 bis 500 Kubikkilometern, was bei Kugelform einen Durchmesser zwischen zwei und acht Kilometern bedeutet. Einige Magma-

In Kürze

- Aus dem Erdmantel **empordringendes Magma** sammelt sich meist zunächst in einer Kammer im Untergrund eines Vulkans. In deren Dach können sich bei steigendem Druck Brüche bilden, die als **Gänge** für den weiteren Aufstieg der Gesteinsschmelze fungieren.
- Brüche breiten sich entlang der Richtung der **maximalen Druckspannung** im Gestein aus. Wechselt diese Richtung an einer Schichtgrenze abrupt, stoppt der betreffende Gang in vielen Fällen.
- Dadurch findet nur jeder vierte bis zehnte **Vulkanausbruch**, der sich anbahnt, auch tatsächlich statt.
- Unter bruchmechanischem Aspekt ähneln viele Vulkane **Verbundwerkstoffen**. Ihr Eruptionsverhalten lässt sich daher analog zur Rissausbreitung in Kompositmaterialien am Computer modellieren.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK, NACH: A. GUDMUNDSSON & S. PHILIPP

Unter der festen äußersten Schale der Erde, der Lithosphäre, befindet sich eine etwa 200 Kilometer dicke Schicht, die zum Teil geschmolzen ist und Asthenosphäre genannt wird. Von dort steigt an einzelnen Stellen durch vertikale Spalten – die Gänge – Magma empor. Es sammelt sich in der Erdkruste, dem oberen Teil der Lithosphäre, zunächst in Kammern und verändert sich dort durch Reaktion mit dem Umgebungsgestein, wobei ein Teil auskristallisiert. Die restliche Schmelze bahnt sich wiederum durch Spalten, darunter auch schräg verlaufende Kegelgänge, den weiteren Weg aufwärts und gelangt so manchmal bis zur Oberfläche, wo sie austritt und einen Vulkan bildet.

kammern sind jedoch größer. Bei den gewaltigsten explosiven Eruptionen in der Vergangenheit wurden 1000 bis 5000 Kubikkilometer vulkanisches Material ausgestoßen. Im Fall einer kugelrunden Magmakammer hätte deren Durchmesser bei 12 bis 21 Kilometern gelegen.

In der Realität dürfte die Kugelform jedoch kaum vorkommen, vielleicht nur bei kleinen Reservoiren am Ende ihrer Lebensdauer. Öfter bilden sich mehr oder weniger verzerrte Ellipsoide. Einige ehemalige solche Kammern lassen sich auf Island als Plutone – in der Tiefe erstarrte Magmakörper, die durch Erosion an der Oberfläche freigelegt wurden – zu Fuß erkunden.

Die meisten Magmakammern sind aber wohl flach wie Münzen. Das gilt insbesondere für diejenigen an den mittelozeanischen Rücken. Münzenförmig waren vermutlich auch die Magmareservoire, aus denen sich die größten explosiven Eruptionen in der Erdgeschichte speisten. Dabei entstanden riesige Calderen, deren horizontale Ausdehnung den Abmessungen der Magmakammer entsprochen haben dürfte. Die größten solchen Einsturzkessel sind etwa achtzig Kilometer lang und dreißig Kilometer breit, nehmen also eine Fläche von mehr als 2000 Quadratkilometern ein. Bei 5000 Kubikkilometern an ausgestoßenem Material muss die Mächtigkeit oder vertikale Ausdehnung der Kammer demnach zwei bis drei Kilometer betragen haben.

Wie aber gelangt die Gesteinsschmelze aus dem unterirdischen Reservoir an die Oberfläche? Spaltenvulkane, deren Kraterreihen die häufigsten Oberflächenerscheinungen von Vulkanausbrüchen sind, werden durch lange, rissartige Gänge mit Magma versorgt. Das gilt aber auch für den größten Teil der anderen Feuerberge. Viele Zentralvulkane entwickeln zwar zusätzlich röhrenartige Förderkanäle. Diese bilden sich jedoch meist erst nachträglich durch Erosion aus spaltenförmigen Brüchen – und das auch nur verhältnismäßig dicht unter der Oberfläche.

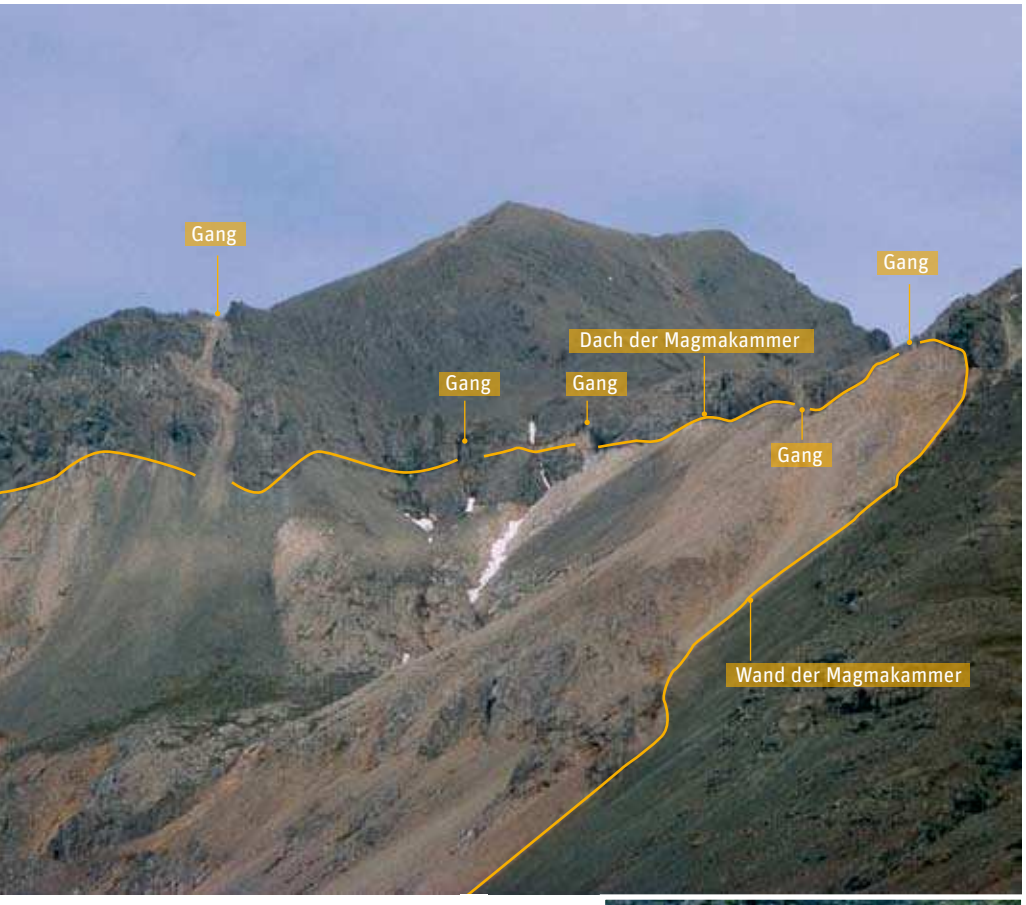
Die meisten Gänge verlaufen fast vertikal oder zumindest sehr steil. Ausnahmen finden sich allerdings in einigen Zentralvulkanen, wo Kegelgänge schräg nach außen ziehen. In tief erodierten Gebieten auf Island lässt sich direkt beobachten, wie Förderkanäle von ihrer erloschenen Magmakammer wegführen.

Je nach der Größe der Magmakammer und dem darin herrschenden Druck kann das Gesteinsvolumen, das ein einzelner Gang an die Oberfläche befördert, stark variieren. Zum Beispiel hat der größte irdische Lavastrom aus historischer Zeit, Laki in Südisland, ein Volumen von etwa 14 Kubikkilometern; der mächtigste Lavastrom der letzten 10000 Jahre, Thjorsarhraun in Südisland, kommt sogar auf zwanzig bis dreißig Kubikkilometer. Im erdgeschichtlichen Vergleich ist das jedoch immer noch wenig. So umfasst ein basaltischer Lavastrom des Columbia-River-Plateaus in den westlichen USA, der vor 640000 Jahren austrat, mindestens 700 Kubikkilometer. Noch ältere Flutbasalte haben geschätzte Volumina von 2000 bis 3000 Kubikkilometern; das entspricht in etwa den Gesteinsmengen, die bei den größten explosiven Eruptionen ausgeworfen wurden.

Gestoppte Gänge

Kämen alle Gänge, die von Magmakammern ausgehen, bis an die Oberfläche, wären Vulkanausbrüche ungefähr vier- bis zehnmal so häufig, wie sie es tatsächlich sind. Somit gäbe es statt 50 bis 60 etwa 200 bis 600 subaerische Eruptionen pro Jahr. Offenbar breiten sich die meisten Brüche, die von Magmakammern ausgehen, nur ein Stück weit aus und stoppen dann. Das zeigen Aufzeichnungen von Erdbeben, geodätische Vermessungen aktiver Vulkane und Untersuchungen an Gängen in tief erodierten erloschenen Feuerbergen. Demnach dringen im langfristigen Durchschnitt nur rund 10 bis 25 Prozent aller von einer Magmakammer wegführenden Gänge bis zur Erdoberfläche vor und liefern Magma für einen Ausbruch.

Ein dramatisches Beispiel stammt aus Südwestisland nahe der Hauptstadt Reykjavik. Hier machte vor 600 Jahren ein basaltischer Gang nur fünf Meter unter der Oberfläche Halt (Bild auf S. 52). Das 1100 Grad Celsius heiße Magma gelangte also bis dicht unter die Füße der damals dort lebenden Menschen. Sicherlich gab es Erdbeben und das umgebende Grundwasser verdampfte. ▷



An erloschenen, stark erodierten Zentralvulkanen lässt sich deren innere Struktur unmittelbar erkennen. Die erstarrte Magmakammer erscheint dann als so genannter Pluton aus einem Tiefengestein wie Granit oder Gabbro. Die ehemaligen Gänge bilden Adern aus verfestigtem Magma. In dem hier gezeigten Slaufudalur-Pluton im Südosten Islands sieht man, wie solche Gänge vom Dach der Kammer ausgehen.

Die zwei Haupttypen von Gängen sind auf diesem Foto zu sehen: ein vertikaler Gang (unten) und ein horizontaler Lagergang (Mitte).

▷ Doch welche Bedingungen im Boden führten dazu, dass das aufsteigende Magma nur fünf Meter unter der Oberfläche noch stecken blieb? Oder allgemein gefragt, welche Umstände oder Prozesse hindern Gänge am weiteren Vordringen und unterbinden so eine Eruption? In diesem Zusammenhang gibt es eine interessante Beobachtung: Bei basaltischen Vulkanen wie den Hawaii-Inseln im Pazifik und La Réunion im Indischen Ozean kommt es im Allgemeinen sehr viel häufiger zu Eruptionen durch Gänge als bei typischen Schichtvulkanen wie dem Fuji in Japan oder dem Vesuv in Italien. Woran liegt das?

Den Schlüssel zur Beantwortung dieser Fragen liefert die Feststellung, dass Gänge das Ergebnis von Brüchen sind. Ein Bruch wird nur gebildet und breitet sich aus, wenn der Spannungszustand im Material, in dem er stattfindet, einen bestimmten Grenzwert überschreitet.

Die mechanische Spannung ist definiert als die Kraft, die pro Flächeneinheit an einem Festkörper angreift oder in ihm wirkt. Damit entspricht sie dem Druck in Flüssigkeiten. Doch gibt es einen wichtigen Unterschied: Anders als in Flüssigkeiten kann die Spannung in Festkörpern in verschiedenen Richtungen unterschiedlich groß sein.

In der Erde werden Spannungen unter anderem durch den Auftrieb von Magma in der Tiefe oder durch das Gewicht eines Krustenblocks hervorgerufen. Übersteigen sie die Festigkeit des umgebenden Gesteins, kommt es zum Bruch, der sich als großräumiger Riss fortpflanzt. Sobald dieser Riss eine Grenzfläche oder eine Gesteinsschicht erreicht, in der ein anderer Spannungszustand herrscht, wirken neue Kräfte auf ihn ein. Dann kann es passieren, dass er seinen Weg ändert oder gestoppt wird. All das gehört zu den Prinzipien der Bruchmechanik und betrifft die Bruchentwicklung in jeder Art von Feststoff – gleich ob Metall, Verbundwerkstoff oder Gestein.

Damit sich ein Gang durch eine Gesteinsschicht in einem Vulkan ausbreiten kann, muss die minimale Druckspannung in dieser Schicht senkrecht und die maximale parallel zu ihm ausgerichtet sein. Stößt zum Beispiel ein vertikaler Bruch bei seiner Fortpflanzung auf ein Gesteinspaket, in dem die maximale kompressive Spannung horizontal verläuft, bestehen zwei Möglichkeiten: ▷

Vulkantypen

Der 9000 Jahre alte Skjaldbreiður im Südwesten Islands ist ein typischer Lavaschild.

Allgemein gesprochen ist ein Vulkan eine Stelle oder Öffnung an der Erdoberfläche, an der geschmolzenes oder zertrümmertes Gestein in Verbindung mit heißen Gasen austritt. Zugleich bezeichnet der Ausdruck den Hügel oder Berg, zu dem sich die ausgestoßenen Materialien anhäufen. Geschmolzenes Gestein wird, solange es sich im Erdinneren befindet, Magma und nach dem Austritt Lava genannt. Die festen Auswurfprodukte – je nach Teilchengröße handelt es sich um Asche, Lapilli oder Bomben – heißen Tephra oder pyroklastisches Gestein.

Feuerberge lassen sich nach der Häufigkeit ihrer Ausbrüche und ihrer internen Struktur in zwei Haupttypen unterteilen: monogene Vulkane, die sich bei nur einem, teils jahrzehntelangen Ausbruch bilden und dabei in erster Linie basaltische Magmen fördern, und polygene Zentralvulkane, die im Verlauf einer Vielzahl von Eruptionen Materialien verschiedener Zusammensetzung und Eigenschaften ausstoßen.

Monogene Vulkane sind der häufigere Typ. Sie umfassen unter anderem Lavaschilde, Kraterreihen (Spaltenvulkane) und Maare (wie sie in der Eifel häufig sind). Ihre genaue Anzahl kennt man nicht, und oft ist es eine Ermessensfrage, was man als eigenen Vulkan bezeichnet oder welche Einzelkrater zu einem größeren Komplex zusammengefasst werden.

Die 1500 bis 1600 aktiven subaerischen Feuerberge auf der Erde, von denen etwa 550 in historischer Zeit ausgebrochen sind, gehören überwiegend zu den polygenen Zentralvulkanen. Diese fördern nicht nur Lavaströme, sondern sind auch berüchtigt für explosive Eruptionen, bei denen sie pyroklastische Gesteine auswerfen. Ihrer Entstehung und äußeren Erscheinung nach unterscheidet man drei Typen: Schicht- oder Stratovulkane, Schildvulkane und Calderen. Zu den erstgenannten zählen einige der berühmtesten Feuerberge wie der Fuji in Japan, der Vesuv in Italien, der Merapi in Indonesien, der Mayon auf den Philippinen und die Hekla in Island. Stratovulkane bilden einen relativ steilen Kegel und sind aus verschiedenartigen Gesteinsschichten aufgebaut; meist wechseln erstarrte Lavaströme und pyroklastische Lagen miteinander ab.

Schildvulkane steigen sanfter an, sind aber dennoch die größten Vulkane der Erde – als Paradebeispiel kann der Mauna Loa auf Hawaii gelten, der sich vom Meeresboden aus 9000 Meter hoch erhebt. Auch sie werden in einer Vielzahl von Eruptionen aufgebaut, wobei jedoch meist nur basaltische Lava ausströmt und erstarrt.

Viele Strato- und Schildvulkane entwickeln irgendwann Calderen. Dies sind kreis- bis ellipsenförmige, kesselartige Senken mit einem Längsdurchmesser von mehr als zwei Kilometern. Sie entstehen, wenn die Decke der Magmakammer einbricht. Das größte bekannte Exemplar auf der Erde ist die Toba-Caldera auf Sumatra (Indonesien). Sie bildete sich vor etwa 75 000 Jahren bei einer enormen explosiven Eruption und hat einen Längsdurchmesser von 80 bis 100 Kilometern.

Ein starker Jahrgang ...

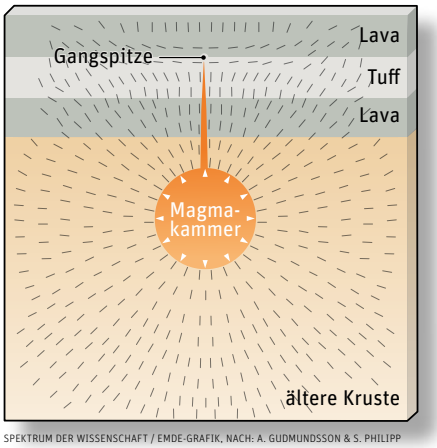
... ist die CD-ROM 2006 von **Spektrum der Wissenschaft.** Sie bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bilder) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die CD-ROM läuft auf Windows-, Mac- und Unix-Systemen (der Acrobat Reader wird mitgeliefert). Des Weiteren finden Sie das spektrumdirekt-Archiv mit über 10 000 Artikeln. **spektrumdirekt** und das Suchregister laufen nur unter Windows. Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,– (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland).

Bestellen können Sie über den Beihefter oder unter:

www.spektrum.de/lesershop

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg | Tel 06221 9126-743 | Fax 06221 9126-751 | service@spektrum.com

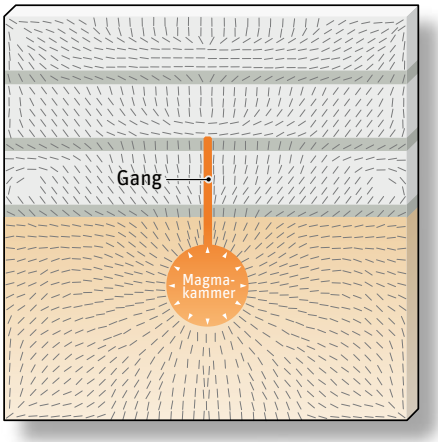
Spektrum DER WISSENSCHAFT Wissen aus erster Hand



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK, NACH: A. GUDMUNDSSON & S. PHILIPP

Im Computermodell lässt sich reproduzieren, wie ein Gang an der Grenze zwischen einer relativ weichen Tuffschicht aus Asche und einem steifen Lavastrom darüber gestoppt wird. Die Richtung der maximalen Druckspannung, ist durch kurze graue Linien angedeutet.

Statt an der Grenze zu einer undurchdringlichen Schicht zu stoppen, kann ein Gang auch in die Horizontale schwenken – zum Lagergang werden – und dort, wo die Spannungsverhältnisse dies wieder erlauben, den Weg nach oben fortsetzen.



▷ ▶ Er knickt ab und wird zum horizontalen Lagergang, wobei er unter geeigneten Bedingungen nach einer gewissen Strecke wieder nach oben abbiegen kann, oder

▶ er bleibt stecken und kommt zum Stillstand.

Beide Fälle sind aus Geländebeobachtungen gut bekannt. Welcher davon eintritt, hängt von der Art des Kontakts zwischen den Gesteinsschichten, der Tiefe unter der Erdoberfläche und dem Magmadruck im Gang ab. Meist jedoch stoppt der Bruch, wenn eine solche Situation eintritt, und es kommt zu keiner Eruption.

Um die Wahrscheinlichkeit dafür abzuschätzen, ob ein Gang während einer vulkanischen Unruhephase die Oberfläche erreicht oder zum Stehen kommt, verwenden wir in der Abteilung Strukturgeologie und Geodynamik der Universität Göttingen numerische Modelle. Diese erlauben uns, den Spannungszustand in allen Schichten des Vulkans grob zu berechnen. Daraus wiederum können wir abschätzen, welchen Weg ein Bruch wahrscheinlich nehmen wird.

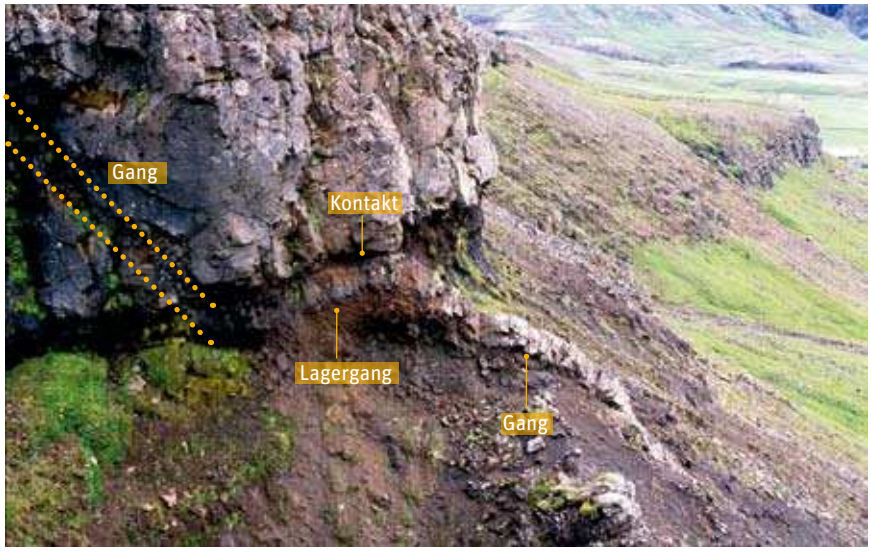
Damit ein Vulkan ausbrechen kann, muss sich, wie gesagt, mindestens ein durchgehender Gang von der Magmakammer bis zur Oberfläche bilden. Das aber setzt voraus, dass jede Schicht und jede Grenzfläche, die der Bruch passiert, einen Spannungszustand aufweist, der seine Ausbreitung begünstigt. Mit anderen Worten: Die Spannung im Vulkankegel muss möglichst homogen sein. Nach unseren Simulationen trifft das bei Stratovulkanen, die aus verschiedenartigen Gesteinsschichten aufgebaut sind und einen relativ steilen Kegel bilden, nur selten zu.

Das deckt sich mit den Beobachtungen. Viele Stratovulkane brechen ausgesprochen selten aus. Zum Beispiel wurden in den letzten 200 Jahren insgesamt 16 große explosive Eruptionen registriert. Elf davon ereigneten sich an Feuerbergen, von denen es keine Berichte über frühere Ausbrüche gab – weshalb ihre vorletzte Eruption in prähistorischer Zeit stattgefunden haben muss, also einige Jahrtausende zurückliegt. In allen elf Fällen mit derart großem Abstand zwischen den jüngsten Ausbrüchen handelte es sich um Stratovulkane oder Calderen.

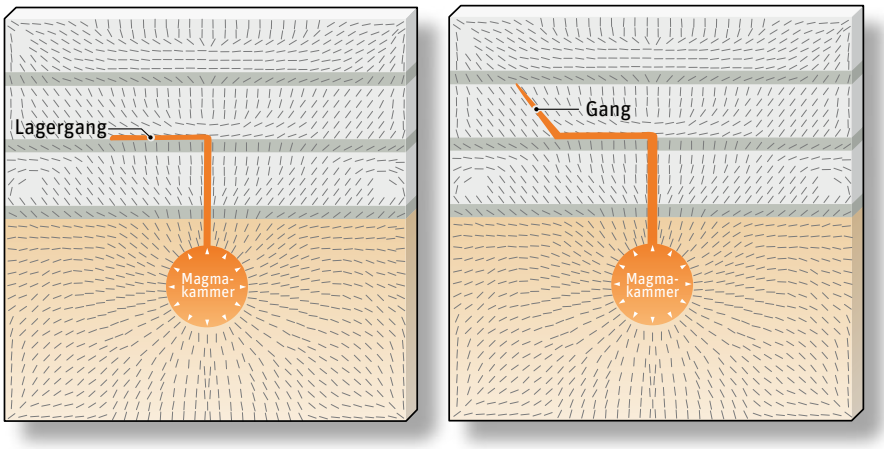
Neben diesen elf explosiven gab es in den letzten zwei Jahrhunderten auch jährlich ein bis zwei nichtexplosive Eruptionen ohne vorhergehende historisch belegte Aktivität. Die meisten davon ereigneten sich ebenfalls an Stratovulkanen. Offenbar haben diese demnach lange Ruhezeiten zwischen einzelnen Ausbrüchen.

Ganz anders verhalten sich die großen basaltischen Schildvulkane, die weniger steil und weit gehend homogen sind. Einige von ihnen brechen erstaunlich oft aus. So gab es in den vergangenen fünfzig Jahren im Mittel alle fünfzehn Monate eine Eruption des Piton de la Fournaise auf Réunion. Davor lag die Ausbruchshäufigkeit zwar etwas niedriger, war aber gleichwohl außergewöhnlich hoch. Seit dem 17. Jahrhundert hat der Vulkan 170-mal Lava gespien, also alle zwei bis drei Jahre. Dies zeigt, dass über Jahrhunderte hinweg die meisten Gänge bis zur Oberfläche vorgedrungen sind.

Ähnliches gilt für den Ätna auf Sizilien, den größten Vulkan Europas. Auch



Wie in der obigen Computersimulation biegt dieser Gang in Westisland an der weichen Kontaktschicht zwischen zwei Lavaströmen ab, wird zum horizontalen Lagergang und verläuft wenig später wieder schräg aufwärts.



er ist in den letzten Jahrzehnten sehr häufig ausgebrochen. Seine Basis bildet ein großer basaltischer Schild, dem mehrere kleinere Stratovulkane aufsitzen. In historischer Zeit waren seine Lavaströme ausnahmslos basaltisch und damit siliziumarm, doch enthält der Ätna auch siliziumreichere Schichten von früheren Ausbrüchen, bei denen glühende Aschewolken vermischt mit größeren Gesteinsbrocken als so genannte pyroklastische Ströme den Hang herabrasten. In den letzten drei Jahrzehnten gab es im Mittel eine Eruption im Jahr, wobei das Magma in der Regel durch Gänge aufstieg. Diese können die Oberfläche des Ätna demnach leicht erreichen.

Auch der Mauna Loa auf Hawaii, der größte Vulkan der Erde, ist ein basaltischer Schildvulkan. Seit 1843, als die detaillierte Aufzeichnung seiner Aktivität begann, wurden 38 Ausbrüche gezählt. Demnach ist in diesem Zeitraum durchschnittlich alle vier Jahre ein Gang bis zur Oberfläche des Mauna Loa vorgedrungen.

Was Vulkane und Verbundwerkstoffe gemeinsam haben

Warum werden in Stratovulkanen anscheinend mehr Gänge gestoppt als in ihren Gegenstücken aus Basalt? Wie unsere Computersimulationen ergaben, liegt die Antwort im Aufbau dieser Vulkane aus verschiedenartigen Gesteinen wie Pyroklasten, Sedimenten, Lavaströmen und Intrusionen. Diese haben teils sehr unterschiedliche Eigenschaften. Manche sind ziemlich weich, andere ausgesprochen steif. Daraus ergeben sich große Unterschiede in den lokalen Spannungen. Deshalb ist es schwierig für einen Gang, einen Weg durch all diese Schichten und Schichtgrenzen zu finden. Immer wieder stößt er auf neues Gestein, und manchmal herrscht die größte Druckspannung eben senkrecht zu seiner Ausbreitungsrichtung oder weiche Lagen fangen Spannungen durch plastische Verformung ab.

Ein Schildvulkan hingegen setzt sich fast völlig aus basaltischen Lavaströmen mit sehr ähnlichen mechanischen Eigenschaften zusammen. Deshalb ist es für einen Gang hier wesentlich einfacher, eine Route nach oben zu finden, an der entlang die Spannungen überall günstig orientiert sind. Dieser Unterschied erklärt auch, warum Calderen in basaltischen Vulkanen viel häufiger entstehen und sich weiterentwickeln als in Stratovulkanen. Aber das ist eine andere Geschichte.

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass unsere Untersuchungen vor allem eines gezeigt haben: Stratovulkane verhalten sich ähnlich wie Verbundwerkstoffe. Das ist auch nicht weiter verwunderlich, denn wie diese sind sie aus unterschiedlichen Materialien aufgebaut. In der Natur kommen Verbundwerkstoffe verbreitet in der Biologie vor. Bäume, Knochen und Muskeln sind nur einige Beispiele. Im technischen Bereich gehören so bekannte, häufig verwendete Materialien wie Beton oder Sperrholz zu dieser Stoffklasse. Vor allem geschichtete Verbundwerkstoffe wie Sperrholz werden in der Industrie heute vielfach in Flugzeugen, Raumfähren, Automobilen, Schiffen und Sportartikeln – zum Beispiel Skiern – eingesetzt. Meist sind sie relativ leicht und vor allem ziemlich fest, sodass sich Brüche nur sehr schlecht darin ausbreiten können.

Das hat denselben Grund wie die schwierige Gangausbreitung in Stratovulkanen: Wechselnde lokale Spannungen an Kontakten zwischen den verschiedenen Schichten behindern oder stoppen die Ausbreitung von Brüchen. Übrigens werden Stratovulkane im Englischen oft als *composite volcanoes* bezeichnet und damit auch begrifflich in die Nähe der Verbundwerkstoffe gerückt, die *composite materials* heißen.

Um das Ausbruchsrisiko von Vulkanen besser abschätzen zu können, dürfte es sich jedenfalls empfehlen, in Zukunft auch Spannungsmessungen im Untergrund durchzuführen. Dabei kann man sich zunächst auf die gefährlichsten Feuerberge beschränken. Mittels einer oder mehrerer Bohrungen lassen sich dort die Spannungen in verschiedenen Tiefen ermitteln. Die erhaltenen Daten sollten dann Aufschluss darüber geben, ob ein Gang, der sich in einer Unruheperiode gebildet hat und einer Magmakammer entspringt, höchstwahrscheinlich die Oberfläche erreicht und folglich ein Ausbruch droht. Zeigt sich dagegen, dass er durch wechselnde lokale Spannungen vermutlich unterwegs gestoppt wird, kann Entwarnung gegeben werden. ◁

Agust Gudmundsson hat nach Professuren am Nordischen Vulkanologischen Institut in Reykjavik und an der Universität Bergen (Norwegen) seit 2003 den Lehrstuhl für Strukturgeologie und Geodynamik an der Universität Göttingen inne. 2002 wurde er zum Mitglied der Academia Europaea gewählt. **Sonja L. Philipp** hat in Jena Geologie studiert und in Bergen promoviert und ist seit Juli 2005 Juniorprofessorin an der Universität Göttingen. Sie befasst sich mit Bruchausbreitung und Fluidtransport, wobei sie Geländestudien mit Computersimulationen kombiniert.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

How local stress fields prevent volcanic eruptions. Von A. Gudmundsson und S. L. Philipp in: Journal of Volcanology and Geothermal Research, Bd. 158, S. 257, 2006

How local stresses control magma-chamber ruptures, dyke injections, and eruptions in composite volcanoes. Von A. Gudmundsson in: Earth-Science Reviews, Bd. 79, S. 1, 2006

How mechanical layering affects local stresses, unrests, and eruptions of volcanoes. Von A. Gudmundsson und S. L. Brenner in: Geophysical Research Letters, Bd. 31, L16606, 2004

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/874890.

Wellness in der Antike

Heiße Quellen und ein mildes Klima lockten den betuchten Römer in den Nobelkurort Baiae – und ein sinnenfrohes Leben, wie es in Rom selbst verpönt war.

Von Theodor Kissel

Was die Götter den Menschen gegeben hatten, konnten sie ihnen auch wieder nehmen. Jahrhundertelang hatten die Reichen und Mächtigen Roms im Nobelkurort Baiae (heute Baia) dem süßen Leben gefrönt, die wohltuenden heißen Quellen und den Meeresblick genossen. Doch ohnmächtig mussten sie um 300 n. Chr. erleben, wie das Meer ihre mondänen Villen verschlang, darunter auch das Praetorium Baianum, den in die Bucht von Baiae hineingebauten Palast des Kaisers Claudius (regierte von 41 – 54 n. Chr.).

Heutzutage ist es die Hauptattraktion eines 80 000 Quadratmeter großen archäologischen Unterwasserparks. Um die im ganzen Imperium berühmte wie auch berüchtigte Stadt zu erforschen, müssen Wissenschaftler aber nicht zwangsläufig Neoprenanzug und Tauchgerät anlegen: In jüngerer Zeit gibt das Meer die versunkenen Ruinen allmählich wieder preis. Pro Tag hebt sich der Seeboden um mehrere Millimeter. Dem liegt derselbe seismische Mechanismus zu Grunde, der die Bucht einst mehrere Meter absinken ließ: der Bradyseismos (wörtlich: »langsames Erdbeben«). Vulkanologen wie Paolo Gasperini von der Technischen Universität Neapel verstehen darunter das allmähliche Heben und Senken der Erdkruste, das mit dem Auffüllen und Entleeren großer Magmakammern unter dem Golf von Neapel einhergeht.

Odysseus im Golf

Diese geologisch instabile Region faszinierte die Menschen der Antike. Dort landete der Sage nach der letzte Troianerfürst Aeneas nach langer Irrfahrt und befragte die Seherin Sibylle über seine Zukunft. Mit dem gleichen Anliegen durchschritt er am Ufer des Averner Sees einen Eingang zur Unterwelt und suchte seinen verstorbenen Vater Anchises auf. In Latium ließ sich Aeneas nieder. Sein Sohn Iulus gründete der Legende nach die Stadt Alba Longa, aus der dann Rom hervorgehen sollte. Aeneas galt den Römern deshalb als Stammvater; insbesondere die Vertreter des iulisch-claudischen Herrschergeschlechts verstanden sich als seine direkten Nachkommen.

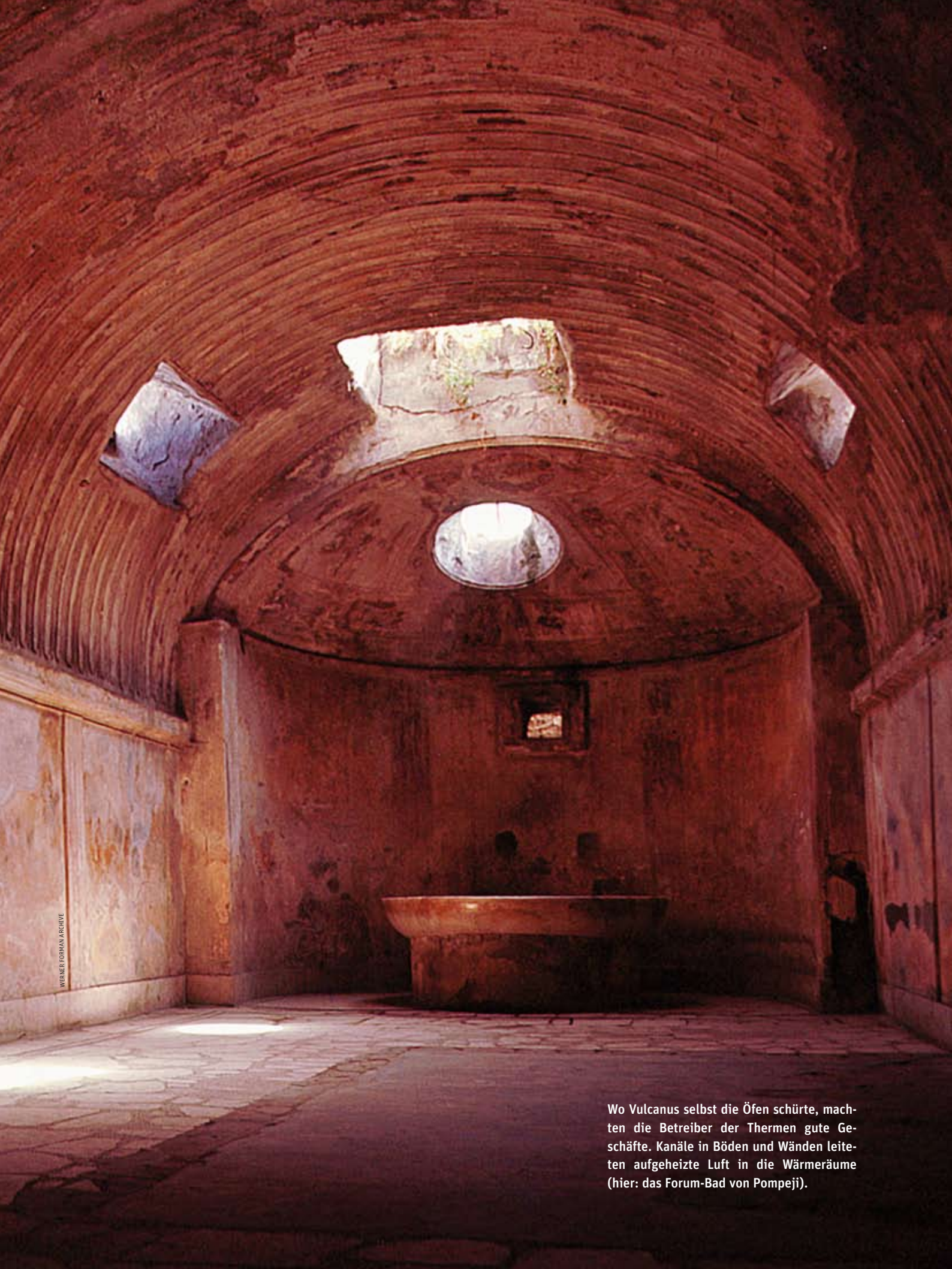
Ein andere Sagengestalt, der listenreiche Odysseus, soll ebenfalls im Golf von Neapel an Land gegangen sein. Er begrub dort einen seiner Gefährten, den Steuermann Baios. Nach ihm, so die Legende, wurde das spätere Baiae benannt.

Während die mythischen Heroen der Gegend nur eine Stippvisite abstatteten, hatten griechische Einwanderer Mitte des 8. Jahrhunderts v. Chr. ernsthafte Absichten. Sie gründeten die Hafenstadt Kyme, später Cumae, die erste griechische Kolonie auf italischem Festland. Von dort aus wurde griechische Kultur in Italien heimisch – darunter auch das später von den Römern übernommene Badewesen.

Die Kolonisten hatten die Gegend mit Bedacht gewählt, schüttete die Natur dort doch ihr Füllhorn freigebig aus. Oliven, Esskastanien, Gemüse und Obstbäume gediehen auf dem vulkanischen Boden prächtig. Aus ihrer Heimat brachten die Siedler Weinstöcke mit. Die nicht zu heißen Sommer und die milden Winter in der Bucht bekamen ihnen gut, als »Falerner« wurde die Traube später von den Römern geschätzt, die gar vom »Wein der Caesaren« sprachen. Kein Wunder also, dass sie der Region den Namen Campania Felix gaben, die »glückliche Landschaft«. Doch mochte Kampanien auch wie ein Paradies auf Erden wirken, um das in grauer Vorzeit selbst die Götter in Streit geraten sein sollen, wie ▷

In Kürze

- Im 2. Jahrhundert v. Chr. begann der Aufstieg der Küstenstadt Baiae zum Nobelkurort, um die Zeitenwende boten **Thermen** jeden erdenklichen Komfort und Luxus. Die Stadt profitierte vom **milden Klima der Region** – und dem **Vulkanismus im Golf von Neapel**.
- Wer auf sich hielt und es sich leisten konnte, ließ sich dort eine prächtige Villa errichten, nach Möglichkeit mit **Meerblick** oder sogar ins Meer hineingebaut.
- Der Bradyseismos, ein **langsames Heben und Senken der Erdkruste**, zerstörte große Teile Baiaes um 300 n. Chr. – und bringt die versunkenen Ruinen inzwischen wieder zum Vorschein.



WERNER FORMAN ARCHIVE

Wo Vulcanus selbst die Öfen schürte, machten die Betreiber der Thermen gute Geschäfte. Kanäle in Böden und Wänden leiteten aufgeheizte Luft in die Wärmeräume (hier: das Forum-Bad von Pompeji).

▷ der griechische Historiker Polybios im 2. Jahrhundert v. Chr. schrieb – unter der Oberfläche brodelte es gewaltig.

Ein anderer Name trug dem Rechnung: Campi Phlegraei, »brennende Gefilde«, nannten die Griechen den von vulkanischen Seen, Kratern und Lavakuppen durchsetzten Landstrich zwischen Kyme und Neapolis, dem heutigen Neapel. Lavaschichten von über 1800 Metern Dicke überziehen jüngsten geologischen Bohrungen zufolge die 150 Quadratkilometer große Region, künden von einem seit Urzeiten tobenden Kampf zwischen der Landschaft und den unzähmbaren Gewalten im Erdinnern. Und dort geht es noch heute heiß her. Die Phlegräischen Felder und der Vesuv haben eine gemeinsame Magmakammer. Sie liegt acht Kilometer tief, ist zwanzig Kilometer breit und vierhundert Quadratkilometer groß – ein Supervulkan.

Zwar gab es schon in der Antike Gelehrte, die zur Erklärung seismischer Phänomene nicht die Götter bemühten. So führte der Philosoph Poseidonios von Apameia (135–51 v. Chr.) – den spärlichen erhaltenen Quellen nach – die periodisch wiederkehrenden Ausbrüche des Ätna auf die Existenz von Höhlen und unterirdischen Gängen zurück, geschaffen von Feuer und Wasser. Diese Naturkräfte suchten stets einen Ausweg aus dem Erdinnern; gelänge dies, seien vulkanische Aktivitäten die Folge.

Revolte der Giganten

Im Allgemeinen aber deutete man solche Phänomene im Rahmen der Mythologie. Der Sage nach entstanden die Campi Phlegraei, als der »feuerlodernde« Unterweltsfluss Pyriphlegethon die Erde zum Kochen brachte. Nach einer anderen Vorstellung benutzte der Schmiedegott Hephaistos dort die Vulkane als Werkstatt. Schlugen Funken und Flammen aus dem Krater, war er bei der Arbeit. Für das unterirdische Grollen in der Nachbarschaft des Vesuv machte eine andere Erklärung die Giganten verantwortlich, Rivalen der olympischen Götter, von Zeus dort eingekerkert. Um sich zu befreien, warfen sie Felsen gegen die Decke ihres Gefängnisses.

Trotz solcher erschreckenden Erscheinungen erschien Kampanien den griechischen Siedlern als Geschenk der Götter. Denn auch der Vulkanismus hatte sein Gutes. Spätestens seit Hippokrates (geboren um 460 v. Chr.) wussten die Ärzte um die heilende Wirkung von heißen Mineralquellen und Schwefeldämpfen. Und bei Baiae traten sie in so großer Zahl aus dem Boden, als sei »der ganze Ort wie durch ein inneres Feuer erwärmt«, wie der römische Dichter Martial im 1. Jahrhundert n. Chr. bemerkte. »Nirgends sprudeln die Quellen reichlicher, nirgends mit intensiverer Heilkraft als in Baiae«, notierte auch sein Zeitgenosse Plinius der Ältere (23–79 n. Chr.) in seiner »Naturgeschichte« und erläuterte im Detail: »die einen durch die Wirkung des Schwefels, andere wiederum durch die des Alauns, wieder andere durch die des Salzes.« Die Römer hatten ihren Machtbereich im 4. Jahrhundert v. Chr. bis nach Kampanien ausgedehnt und Kyme 338 v. Chr. zur Kolonie Cumae gemacht. Erstmals erwähnen römische Autoren die Heilquel-

BILDARCHIV STEFFENS

len von Baiae, anfangs Aquae Cumanae genannt, im Jahr 178 v. Chr., als der Konsul Gnaeus Cornelius dort sein Rheumaleiden kurierte. Von da an begann Baiaes Aufstieg als Kurort.

Um die Zeitenwende existierten dort bereits diverse Badeanstalten, die jenen in Rom an Komfort und Extravaganz in nichts nachstanden. »Alle Annehmlichkeiten stehen zur Verfügung«, warb ein Betreiber über dem Eingang seines Thermengebäudes. Wie diese aufgebaut waren und was es bedeutete, im luxuriösen Ambiente zu baden, hat der römische Literat Lukian in seiner im 2. Jahrhundert n. Chr. entstandenen Schrift »Hippias oder das Bad« ausführlich beschrieben:

»... folgen zu beiden Seiten Kammern, wo die Badenden ihre Kleider ablegen können, und zwischen ihnen erhebt sich ein sehr hoher und wohl erleuchteter Saal, der mit drei großen Bassins von kaltem Wasser, die mit grünem Marmor ausgelegt sind, versehen ist sowie mit zwei Bildsäulen von weißem Stein, von denen die eine die Göttin der Gesundheit und die andere Äskulap darstellt. Von hier aus geht man in einen sehr großen, auf allen Seiten rundgewölbten Raum, wo einem eine gelinde, nicht unangenehme Wärme entgegenströmt und der in ein überaus freundliches Gemach führt, wo man sich salben lässt und aus welchem zwei mit phrygischem Stein überkleidete Pforten in die Palästra führen. Auf dieses folgt der schönste aller Säle, dessen Wände ebenfalls von unten bis an die Decke von phrygischem Stein funkeln. Er ist mit bequemen Sitzen versehen und so eingerichtet, dass man sich nach dem Bade gut darin aufhalten und nach Belieben reiben und massieren lassen kann. Von da kommt man durch einen mit numidischem Marmor ausgelegten Durchgang in den letzten Saal, der den übrigen an Schönheit in nichts nachsteht, Licht im Überfluss hat und wie mit blühendstem Purpur bekleidet scheint. Hier sind drei Bassins mit heißem Wasser.«

Auch für das leibliche Wohl war gesorgt, dank zahlreicher Garküchen, Imbissbuden und Restaurants rings um die Badeanstalten. Neben Hygiene und Heilung boten Baiaes Thermen zudem ein umfassendes Freizeitangebot, von Sport bis Bildung. Dergleichen ging nicht unbedingt geräuschlos vonstatten, wie der Philosoph Seneca (1–65 n. Chr.) einst klagte: »Ausgerechnet über einem Bade wohne ich. Stell dir also alle Arten von Stimmen vor, die mich so weit bringen, dass ich mein Gehör zu hassen beginne. Wenn Kraftprotze sich im Gewichtheben mit Bleihanteln trainieren, wenn sie sich anstrengen oder zumindest so tun, als ob, höre ich sie schnaufen.

Die Sosandra-Thermen Baiaes verkörperten das Ideal des Wohllebens, wie es Plinius der Ältere formuliert hatte: Baden mit Blick auf das offene Meer.

Baia, das römische Baiae, profitierte vom milden Klima im Golf von Neapel. Heute lockt ein archäologischer Unterwasserpark Besucher an.

Die Leiden des Seneca

Sooft sie den angehaltenen Atem freilassen, höre ich pfeifende und quietschende Geräusche. Oder ich bemerke einen trägen Faulpelz, der sich mit einer gewöhnlichen Salbung zufrieden gibt, höre das Klatschen der Hände auf seinen Schultern. ... Nimm nun noch einen Zankteufel und einen ertappten Dieb und einen hinzu, der gerne seine eigene Stimme im Bade hört; ferner noch die, welche unter lautem Aufklatschen des Wassers ins Becken springen. Oder denke dir einen Haarausrupfer, der, um sich bemerkbar zu machen, seine dünne Stimme hervorpresst und erst schweigt, wenn er jemandem die Haare unter den Achseln ausreißt, wofür dann der Gerupfte losschreit. Und endlich die verschiedenen Ausrufe der Kuchenhändler, der Wurstverkäufer und Garkücheninhaber, die, jeder in seiner eigentümlichen, durchdringenden Tonart, ihre Ware anpreisen.«

Er hätte wohl besser über einem der Ruheräume logiert, die der Entspannung ebenso dienten wie schattige Wandelgänge und lauschige Gärten. Oder oberhalb der hauseigenen Bibliothek, die mit geistigen Genüssen aufwartete.

Diese römische Badekultur war Ausdruck eines verfeinerten Lebensstils, der in der Hauptstadt wie überall im Imperium seit dem 1. Jahrhundert n. Chr. gepflegt wurde. Dabei standen einst die Vorfahren der Römer derartigen Vergnügungen ablehnend gegenüber: Übermäßiges Baden lauge den Körper aus! Deshalb wusch man sich täglich die Arme und Beine, ein Vollbad kam indes nur etwa alle neun Tage in Frage, berichtete Seneca über die von ihm verehrten Altvorderen. Auch der Philosoph konnte dem häufigen Baden nichts abgewinnen, noch weniger den Heißluftbädern, da sie zur Verweichlichung von Körper und Geist beitrügen. Schweiß, so Seneca, solle durch harte Arbeit austreten. Doch mit dieser Ansicht stand der Erzieher Neros nahezu allein. Schon in der Endzeit der Republik hatten sich die Römer den Annehmlichkeiten der griechischen Kultur geöffnet. Den therapeutischen Nutzen des Wassers erkannte bereits der bithynische Arzt Asklepiades von Prusa zu Beginn des 1. Jahrhunderts v. Chr. Wechselnde Kalt- und Warmwasserkuren sollten den Körper heilen. Der kaiserliche Leibarzt Galenos (129–199 n. Chr.) verglich diese Hydrotherapie mit der »Stählung des Eisens«.

In Baiae ließ sich damit gutes Geld machen, ebenso mit heißen Dämpfen, Mineralschlammpackungen und Thermalwasser-Trinkkuren. Das nahe Meer ermöglichte die Thalassotherapie mit Salzwasser und Algenpackungen etwa gegen Gelenkbeschwerden. Am Strand wurden Patienten in heißen Sand gepackt, um rheumatische Leiden, Nerven- ▷

▷ schmerzen und Nervenerkrankungen zu lindern. Und auch dem Baden im Meer sowie gymnastischen Übungen im Salzwasser wurden heilsame Effekte zugeschrieben.

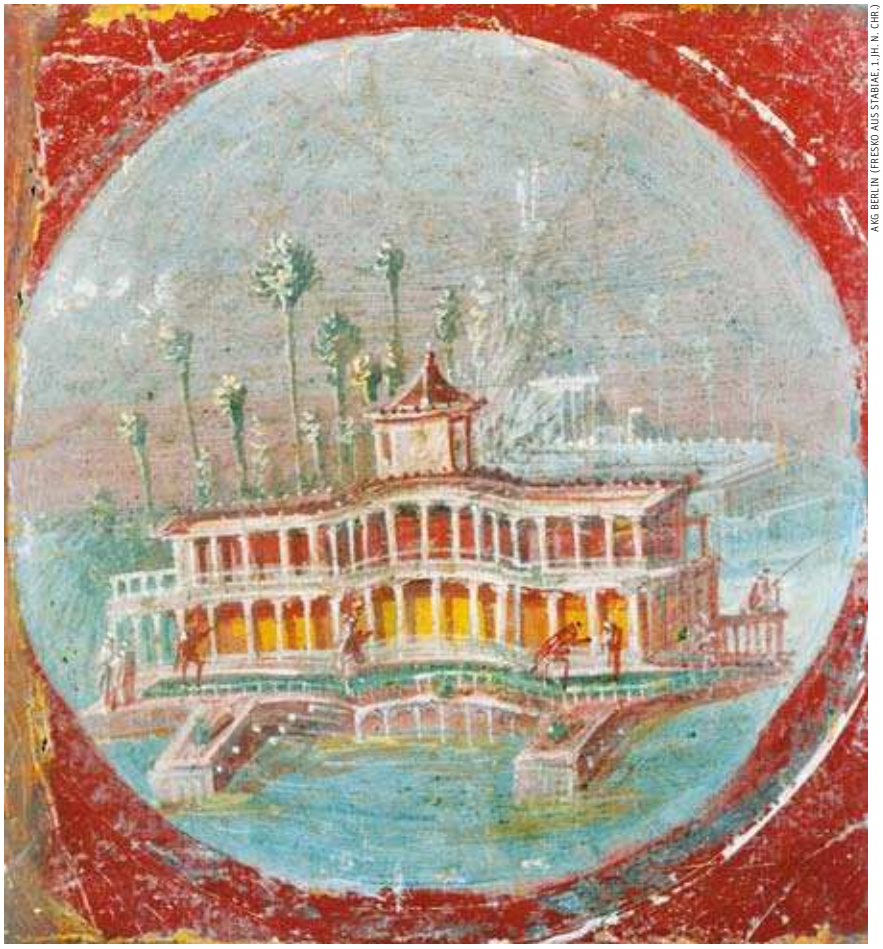
Einige der Kurhäuser des antiken Baiae sind noch heute vor Ort zu sehen, ihrer Monumentalität wegen oft als »Heiligtümer« bezeichnet: Unter der Kuppel des Merkur-Tempels befand sich einst ein Schwimmbecken; den Diana-Tempel deuten Archäologen als Schwitzraum (siehe Foto rechte Seite); der Venus-Tempel war möglicherweise das Privatbad des Kaisers Hadrian, der im Jahr 138 n. Chr. in Baiae verstarb. Zu den imposantesten Schöpfungen römischer Badearchitektur zählen die Sosandra-Thermen, ein sich über mehrere Terrassen erstreckender, zum Meer hin absteigender Badekomplex aus dem 1. Jahrhundert n. Chr. Gut zu erkennen sind noch heute die in den Tuffstein gemeißelten Sitzbadewannen. Hier wurde der von Plinius gelobte Blick auf das offene Meer »aus der wunderbaren Warmwasserwanne« Wirklichkeit – im 1. Jahrhundert n. Chr. war das Kuren in der freien Natur en vogue.

Um ihre Thermalbäder zu beheizen, verwendeten die Römer die von den Griechen ersonnene Hypokaustheizung (*hypocaustos*: »von unten geheizt«). Doch während andernorts ein Feuer die Luft erwärmen musste, die dann über Hohlziegel in Fußböden und Wände geleitet Behaglichkeit verbreitete, konnten sich die Thermenbetreiber in Baiae einfach an das Heiznetz der Natur anschließen.

Heilen mit Dampf und Schwefel

»Die Einwohner leiten den Dampf durch Rohre in obere Räume hinauf, in denen er für die Dampfbäder verwendet wird«, beschrieb Cassius Dio im 3. Jahrhundert n. Chr. diese Heizmethode. Fußbodentemperaturen von bis zu sechzig Grad Celsius waren durchaus keine Seltenheit, wie Archäologen in Experimenten ermittelt haben. Mit Respekt notierte Plinius über die heißen Dämpfe, »dass sie ganze Bäder erwärmen und sogar das kalte Wasser in den Badewannen zum Sieden bringen konnten. Und in den Posidanischen Gärten kocht man mit ihnen sogar das Gemüse«.

»Die warmen Bäder von Baiae«, schrieb der griechische Geograf Strabo (um 64 v. – 19 n. Chr.), »dienten nicht nur der Heilung von Krankheiten, sondern auch dem Vergnügen.« Tatsächlich kamen manche Kurgäste nicht der heilenden Thermalquellen wegen, sondern wollten einfach nur dem Alltagsstress entfliehen, die Seele baumeln lassen und dem sprichwörtlich gewordenen *otium Baianum*, dem »süßen Nichtstun von Baiae«, frönen. Andere wiederum, und das waren nicht wenige, lockte das pure Vergnügen.



AKG BERLIN (FRESKO AUS STABIAE, 1. JH. N. CHR.)

Die Villa mit Meerblick genügte manchen Bewohnern Baiaes nicht, sie ließen ihre Anwesen gleich ins Meer hineinbauen. Eine Art Beton aus vulkanischem Gestein machte es möglich.

»Einst war das Wasser in Baiae kühl. Da ließ Venus den Liebesgott Amor darin schwimmen. Ein Funke seiner Fackel fiel hinein und entzündete es. Seitdem verfällt jeder, der dort badet, feuriger Liebeslust«, beschrieb ein ansonsten unbekannter antiker Poet namens Regianus die heißen Quellen. Sein Kollege Martial (4064 – 104 n. Chr.) schwärmte vom »goldenen Ufer der seligen Venus und des rauschhaften Bacchus«. Die Verknüpfung von Baiae mit der Liebesgöttin und dem Gott des Weines war nicht nur poetischer Duktus, wie ein Zweizeiler auf einem Grabstein in Baiae bestätigt: »Bäder, Weine und Liebe, sie ruinieren unsere Körper, aber sie machen das Leben aus.« In der sonnenverwöhnten Stadt traf sich die antike Spaßgesellschaft, feierte ausgelassene Strandpartys und vergnügte sich bei nächtlichen Ausflugsfahrten aufs Meer.

Dass man und frau sich dabei näherkam, verstand sich. Baiae war ein Ort, an dem man »die Körperwärme anderer konsumieren« konnte, wie Seneca spottete. »Herberge der Laster« schalt er das mondäne Seebad weniger feinsinnig und schrieb der Verderbtheit des Ortes einen verheerenden Einfluss zu, gegen den selbst größte sittliche Strenge nicht ankam. Auch der Satiriker Martial frotzelte, dass manch eine unnahbare Matrone, »die als verheiratete Penelope nach Baiae kam«, den Ort später »als untreue Helena« verlassen habe.

»Hier verkehrte jeder mit jedem, auch die Älteren wurden wieder aktiv, Knaben ließen sich als Frauen gebrauchen«,

echauffierte sich der römische Gelehrte Marcus Terentius Varro (116–27 v. Chr.) über dieses römische Sodom und Gomorrha. Für den Dichter Ovid (43 v.–17 n. Chr.) hingegen war Baiae ein idealer Ort zum Knüpfen von Kontakten aller Art. »Wer dort zur Kur weilt, muss damit rechnen, dass sich sein Gebrechen ins Herz verlagert – er wird krank, indem er sich verliebt.« So erging es offenbar der Gefährtin seines Kollegen Properz (50–16 v. Chr.), die sich einen Kurschatten anlachte, weswegen der Gehörnte im entfernten Rom zur Feder griff und seine Angebetete beschwor, diesen unsittlichen Ort so bald wie möglich zu verlassen: »Verflucht seien die Quellen, da sie wahre Liebe zerstören.«

Schnelle Nummer für zwei Asse

In Baiae vergnügte sich allerdings nicht nur Roms High Society. Allabendlich fielen erlebnishungrige Nachtschwärmer ein, meist Soldaten der kaiserlichen Flotte aus dem benachbarten Marinestützpunkt Misenum oder Tagelöhner aus dem nahe gelegenen Handelshafen Puteoli. Sie verkehrten freilich in den zahlreichen Straßenkneipen, in denen man nicht nur seinen Durst für wenig Geld löschen konnte. Ein bis zwei Asse, so viel wie ein Laib Brot, kostete eine schnelle Nummer mit der Bedienung im Hinterzimmer.

Doch solche Geschäfte waren Randerscheinungen. »Baiae war nie eine gewöhnliche Stadt, sondern ein Luxusort – so etwas wie das St. Tropez der Antike«, bekräftigt Paola Miniero, leitende Denkmalpflegerin von Neapel. Dort trafen sich die Reichen und Mächtigen des römischen Establishments, Senatoren der Republik ebenso wie später die Kaiser. Wer das ländliche Idyll suchte, abseits des hektischen Rom, sah sich bald betrogen. Denn immer mehr Stadtrömer ließen dort ihre Villen errichten. Der Konsul und Erzrepublikaner Marcus Tullius Cicero (106–43 v. Chr.) besaß in Baiae ebenso ein komfortables Wochenenddomizil wie sein politischer Gegner Gaius Iulius Caesar (100–44 v. Chr.). »Eine Prachtvilla nach der anderen schoss nun bei Baiae aus der Erde«, beschrieb der römische Geograf Strabo die Entwicklung auch noch einige Jahrzehnte später, »sodass der ganze Golf von Neapel nun übersät ist mit Palästen.«

Ausgestattet waren diese mit allem nur erdenklichen Luxus und technischer Raffinesse. Parkartig angelegte Gärten und farbenprächtige Volieren zierten säulenumstandene Innenhöfe. Munter plätschernde Wasserspiele erfreuten Bewohner wie Gäste. Als besonders chic galt der kunstvoll gestaltete Fischteich mit der regulierbaren Mischung von Süß- und Meerwasser. An Raffinement jedoch kaum zu überbieten war eine Konstruktion aus Steigleitungen in den Säulenschäften, aus denen sich Wasserstrahlen in den Raum ergossen.

Immer ausgefallener konzipierten die Architekten ihre Schöpfungen. Mancher Luxuspalast an der Küste erstreckte sich sogar ins Meer hinein. Der steinreiche Patrizier Crassus nutzte heiße Gase, die vom Seeboden aufstiegen, gleich fürs Dampfbad – nichts war unmöglich! Dass dergleichen gelang, verdankten die römischen Architekten einer Art Naturbeton, dessen besondere Eigenschaften der Bauschriftsteller Vitruv in seinem Werk »Über die Architektur« eingehend darlegte: die noch heute in der Region abgebaute Puzzolan-Erde, ein fein zermahlenes vulkanisches, ton- und kieselhal- ▷

Der »Diana-Tempel«, erbaut im 2. Jahrhundert n. Chr., gehört zu den wenigen Überresten der prachtvollen Thermenanlagen von Baiae.

BILDARCHIV STEFFENS

▷ tiges Gestein, das durch Zusatz von gelöschtem Kalk einen Spezialmörtel ergibt, der wie Beton auch unter Wasser abbindet.

Mit diesem »hydraulischen« Mörtel wurde einst auch die Meeresvilla des Lucius Piso gebaut, Schwiegervater von Iulius Caesar, auf deren Überreste kürzlich Archäologen auf dem Meeresgrund vor Baiae stießen. Bleirohre mit dem Namen des Besitzers – Teil einer Wasserleitung – wiesen den Forschern den Weg. Neben Fußbodenmosaiken fanden sich dort auch Spuren eines von Meerwasser gespeisten Fischzuchtbeckens. In den Bassins tummelten sich einst vermutlich Schwärme von Edelfischen wie Wolfsbarsch, Muräne, Seebarbe oder Papageienfisch. Manch einer dieser *piscinarii*, wie Cicero diese »hochwohlgeborenen Herren Villenbesitzer« nannte, hielt sich die Fische als Zierde, wie Antonia die Jüngere, Mutter des Kaisers Claudius, die laut Plinius ihre Lieblingsmuräne gar mit Ohrringen schmückte. Andere witterten in der Fischzucht ein einträgliches Geschäft – eine Seebarbe konnte bis zu 5000 Sesterze beziehungsweise 20 000 Asse einbringen. Smarte Geschäftsleute wie der Immobilienspekulant C. Sergius Orata ließen ihre Zuchtbecken zur Steigerung der Produktion gar von unten beheizen.

Edelfisch nach Art des Hauses

Ob Hobby oder Kommerz, *piscinae* waren aus der Villenarchitektur des 1. Jahrhunderts n. Chr. einfach nicht mehr wegzudenken. Selbst Besitzer von weiter im Inland gelegenen Landhäusern wollten darauf nicht verzichten: Der Schlemmer Lucullus ließ eigens einen Kanal durch den Berg graben, um Meerwasser in seine Becken zu leiten. Dieser Kanal, der mehr kostete als die ganze Villa, trug dem Erbauer den Spitznamen »Xerxes in der Toga« ein – hatte der Perserkönig für seine Flotte doch bei seinem Griechenlandfeldzug im Jahr 490 v. Chr. den Berg Athos zu durchstechen versucht.

Auch Roms Imperatoren schätzten die Annehmlichkeiten des Nobelkurorts. Mehrfach im Jahr frönten sie in Baiae der Verschwendungssucht. Caligula (37–41 n. Chr.), jener Kaiser, der dem »Caesarenwahn« seinen Namen gab, machte mit einem spektakulären »Ritt über das Meer« Furore: Auf einer eigens für diesen Auftritt gebauten, fünf Kilometer langen Schiffsbrücke zwischen Puteoli und Bauli galoppierte er im Gewand Alexanders des Großen über den Golf von Neapel. Einem seiner Nachfolger diente das beschauliche Gefilde als Kulisse für ein ebenso spektakuläres wie hinterhältiges Attentat: Nero (54–68 n. Chr.) ver-

AKG BERLIN (PETER CONNOLLY: REKONSTRUKTION DER THERMEN VON STABIAE, BLICK VON DER OSTSEITE, 1979)

A Haupteingang
B Innenhof zur sportlichen Ertüchtigung *(palaestra)*
C Schwimmbecken *(piscina)*
D Salbräume *(unctuaria)*
E Tretrad
F Wasserhebewerk

a Umkleideraum *(apodyterium)*
b beheizter Raum *(tepidarium)*, in dem man sich auf das *caldarium* einstimmte
c Kaltbadebereich *(frigidarium)*
d Warmbadebereich *(caldarium)*
e Heizstelle für das Schwitzbad *(praefurnium)*
f Schwitzbad *(laconium)*

Frauenbad
1 *apodyterium*
2 *tepidarium*
3 *caldarium*

Nobel zu speisen verstand der römische Kaiser Claudius, wie die Rekonstruktion des Speisesaals seiner im Meer versunkenen Villa bezeugt.

GIOVANNI LATTANZI, WWW.ARCHART.IT

suchte seine Mutter Agrippina mit einem präparierten Schiff zu ertränken. Dessen Planken sollten sich auf hoher See lösen, die Kajüte beim Auseinanderbrechen des Schiffs Agrippina erschlagen. Der komplizierte Plan schlug fehl und Nero griff auf das altbewährte Mittel des Auftragsmords zurück.

Baiae war ihm gut bekannt, hatte doch sein Stiefvater, Kaiser Claudius (41–54 n. Chr.), für seine Familie direkt am Meer eine prächtige Sommerresidenz errichten lassen, das *praetorium Baianum*. Dieses verschwand um 300 n. Chr. komplett im Meer, als die gesamte Küstenregion des neapolitanischen Golfs auf Grund des Bradyseismos um sechs Meter absank. Sämtliche am Ufer gelegenen Gebäude, Villen, Thermen, Hafenanlagen und Molen – nicht nur in Baiae –, versanken allmählich unter dem Meeresspiegel. Jahrhundertelang blieb der Palast des Claudius in Neptuns Reich verborgen, bis Archäologen vom »Zentrum für Unterwasserforschung« in Neapel Teile davon vor der Landzunge Punta dell' Epitaffio entdeckten. Vorsichtig wurden die Fundstücke mit einem Druckwasserstrahl aufgelockert, Abfallprodukte samt Meeresschlick abgesaugt. In mehreren Kampagnen legten die Forscher in sieben Meter Tiefe einen 18 Meter langen und 9,5 Meter breiten Saal frei, dessen Tonnengewölbe unter dem Wasserdruck eingestürzt war. In diesem Trümmerfeld fanden die Taucher Statuen, die einst in Wandnischen standen, darunter Skulpturen der kaiserlichen Familie, des Odysseus und seines Gefährten Baios, des mythischen Gründers von Baiae.

Thermen waren Tempel des Wohlseins. Man genoss das Schwitzen in heißen Räumen ebenso wie die anschließende Abkühlung im Schwimmbecken.

Speisezimmer unter Wasser

Sie bildeten die Kulisse für ein schwimmendes Speisezimmer, in das Boote vom Meer aus durch einen Stichkanal hineinfahren konnten. Plinius der Jüngere (62–114 n. Chr.) beschrieb ein solches Ambiente in seiner »Naturgeschichte«: »Ein Ruhebett aus weißem Marmor umgibt ein Becken, in dem das Wasser auf geheimnisvolle Weise so reguliert wird, dass es immer gefüllt ist, aber nicht überläuft. Vorspeise und schwere Schüsseln werden auf den Rand gestellt, leichtere schwimmen in Terrakottaschiffchen in Form von Wasservögeln umher.«

In diesem exklusiven Ambiente wurde einst kaiserlich getafelt: Am Kopfende lagen Claudius und seine Gemahlin Messalina zu Tisch, an den Längsseiten die Gäste. Hinter den Gastgebern, in einer sechs Meter breiten Nische, standen die auf dem Meeresboden gefundenen Statuen des Odysseus und des Baios; dazwischen war vermutlich eine Figur des einäugigen Riesen Polyphem plaziert, dem Odysseus eine Trinkschale mit unvermischtem Wein reicht. Die Darstellung dieses Mythos war in der Antike ein beliebtes Motiv. Eine Rekonstruktion dieses prachtvollen Speisesaals gehört zu den Highlights des Museo Archeologico dei Campi Flegrei im modernen Baia.

Was nicht geborgen werden konnte, ist als archäologisches Unterwassermuseum zu besichtigen. Allerdings darf dort niemand ohne Anmeldung und Führer unterwegs sein, denn der Schutz der antiken Kulturgüter genießt oberste Priorität. »Unser größtes Problem besteht darin, ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Präsentation und dem Erhalt der Funde zu finden«, erklärt die Unterwasserarchäologin Alessandra Benini. So werden Mosaike nur teilweise ausgegraben und zwischen den Unterwasserführungen mit Sandsäcken geschützt. Geht es nach Vito Amendolara, dem Präsidenten des Unterwassermuseums »Baia Sommersa«, dann soll die antike Unterwasserwelt auch für diejenigen erschlossen werden, die sich keinen Neoprenanzug überstreifen wollen: »Wir möchten mit Bildschirmtechnik das, was unter Wasser ist, an die Oberfläche bringen, in eine Art Open-Air-Kino.« Man darf also gespannt sein. ◁

Theodor Kissel ist Althistoriker in Mainz.

AUTOR

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/874888.

Quantenradierer selbst gemacht

Mit leicht verfügbarem Material können Sie daheim ein Experiment ausführen, das einen besonders seltsamen Effekt der Quantenmechanik veranschaulicht. Je nachdem, ob man sich Information über den Weg von Lichtstrahlen verschafft oder nicht, verhalten diese sich wie Teilchen oder Wellen.

Von Rachel Hillmer und Paul Kwiat

Aus der Theorie der Quantenmechanik geht bekanntlich hervor, dass die Natur sich im Grunde äußerst fremdartig verhält. Scheinbar selbstverständliche, aus unserem Alltag gewohnte Vorstellungen über die Realität werden über den Haufen geworfen. Widersprüchliche Alternativen können zusammen bestehen; beispielsweise vermag ein Objekt gleichzeitig zwei unterschiedlichen Wegen zu folgen. Ort und Geschwindigkeit eines Objekts lassen sich nicht gleichzeitig exakt bestimmen; und die Eigenschaften von beobachteten Objekten und Ereignissen können einer unvermeidlichen Zufälligkeit unterliegen, die nichts mit der Unvollkommenheit unserer Beobachtungswerkzeuge zu tun hat.

Verflogen ist die vertraute Welt, in der Atome und andere Partikel wie wohlerzogene Billardkugeln auf dem grünen Tuch der Realität umherrollen. Vielmehr verhalten sie sich – manchmal – wie Wellen, die sich über ein Gebiet verteilen, einander kreuzen und Interferenzmuster bilden.

Doch immerhin scheint all diese Fremdartigkeit erst weit entfernt vom Alltagsleben aufzutreten. Am deutlichsten machen sich Quanteneffekte in winzigen Systemen bemerkbar, etwa an Elektronen, die in einem Atom gebunden sind. Theoretisch weiß man zwar, dass die moderne Technik großenteils auf Quantenphänomenen beruht und dass im Labor allerlei Kunststücke mit Quanten aufgeführt werden können, aber zu Hause gibt es das doch wohl nur zu sehen, wenn eine Wissenschaftssendung im Fernsehen darüber berichtet. Richtig? Nicht ganz.

Auf den folgenden Seiten zeigen wir, wie man ein Experiment aufbaut, das einen so genannten Quantenradierer veranschaulicht. Dieser Effekt beruht auf einer der seltsamsten Eigenschaften der Quantenmechanik: Sie erlaubt uns bestimmte Handlungen, durch die sich unsere Interpretation vergangener Ereignisse grundlegend ändert.

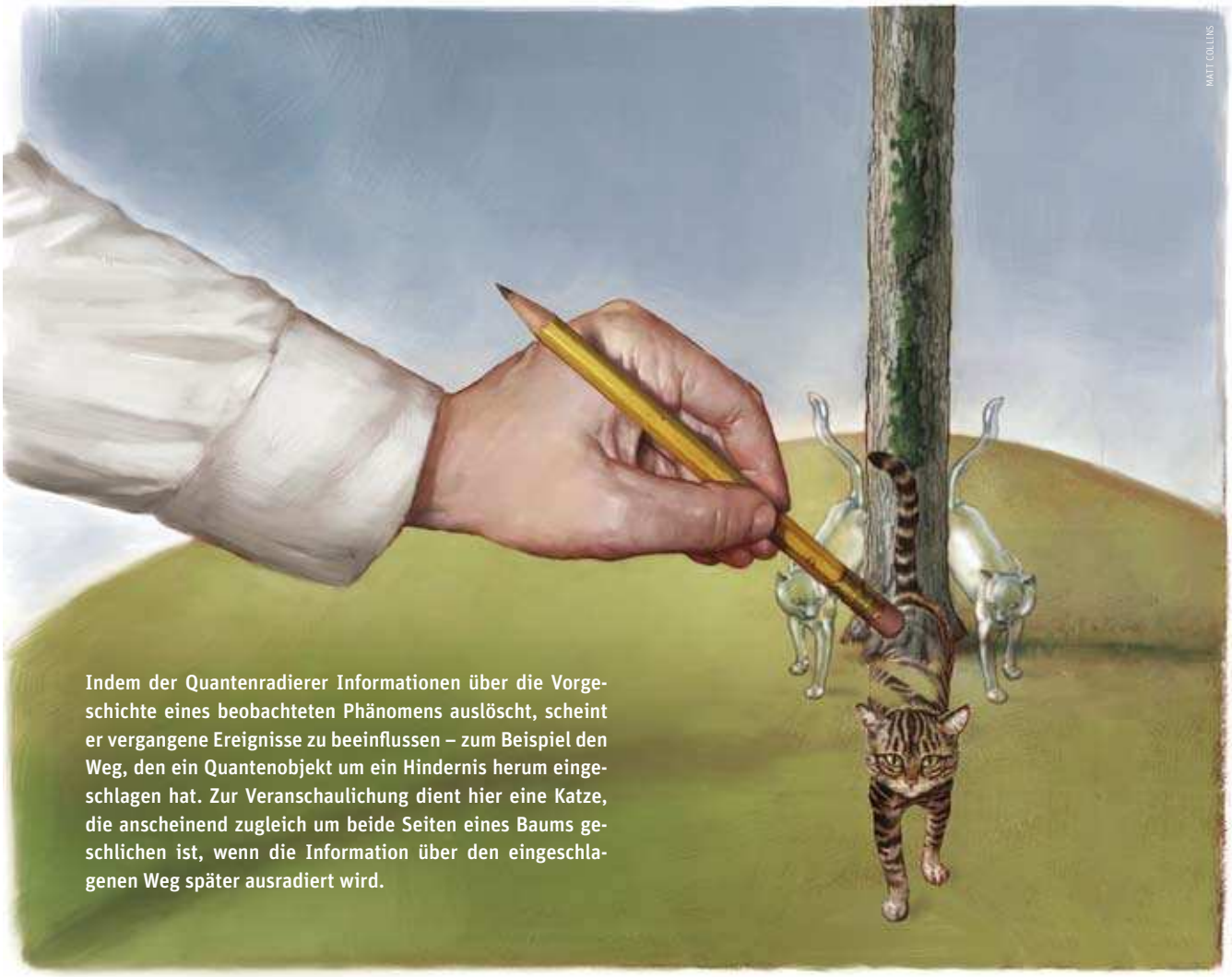
Unheimlicher Tanz der Photonen

Bevor wir erklären, was wir damit meinen, und das Experiment selbst beschreiben, müssen wir der Wahrheit halber eine wichtige Einschränkung aussprechen. Das Lichtmuster, das bei erfolgreicher Durchführung des Versuchs zu sehen sein wird, lässt sich auch erklären, indem man das Licht als klassische Welle beschreibt, ohne die Quantenmechanik zu bemühen. So gesehen bleibt unser Experiment hinter seinem Anspruch zurück; es vermag den Quantencharakter des Effekts nicht vollständig zu demonstrieren.

Dennoch vollführen die einzelnen Lichtquanten oder Photonen, aus denen die Lichtwelle besteht, tatsächlich den kompletten Quantentanz in all seiner Unheimlichkeit – obwohl man, um das streng zu beweisen, die Photonen einzeln durch den Apparat schicken und eines nach dem anderen nachweisen müsste. Leider übersteigt das die Möglichkeiten eines Hobbybastlers bei Weitem. Aber wenn Sie die Muster in Ihrem Experiment beobachten und darüber nachdenken, was sie vom Standpunkt des einzelnen Photons aus bedeuten, gewinnen Sie einen unmittelbaren Eindruck von der bizarren Quantenwelt.

Falls Sie geradewegs zum Experiment schreiten wollen, blättern Sie weiter zur Doppelseite 70/71. Die hier anschließende – und auf S. 72 fortgesetzte – Diskussion befasst sich gründlicher mit dem wissenschaftlichen Hintergrund des Quantenradierers. Mit dieser Erklärung werden Sie besser verstehen, was unser Experiment demonstriert; vielleicht werden Sie darauf zurückkommen wollen, nachdem Sie gesehen haben, wie dieser spezielle Radierer sich verhält.

Zu den seltsamen Eigenschaften der Quantenphysik gehört, dass das Verhalten eines Objekts davon abhängen kann, was wir über es herauszufinden versuchen. Ein Elektron kann sich als Teilchen oder als Welle verhalten, je nachdem, welches Experiment wir anstellen. Teilchenförmiges Verhalten tritt auf, wenn wir den speziellen Weg feststellen, dem ein Elektron gefolgt ist – und wel- ▷



Indem der Quantenradierer Informationen über die Vorgeschichte eines beobachteten Phänomens auslöscht, scheint er vergangene Ereignisse zu beeinflussen – zum Beispiel den Weg, den ein Quantenobjekt um ein Hindernis herum eingeschlagen hat. Zur Veranschaulichung dient hier eine Katze, die anscheinend zugleich um beide Seiten eines Baums geschlichen ist, wenn die Information über den eingeschlagenen Weg später ausradiert wird.

Was Sie für das Experiment brauchen

- ein sehr **dunkles Zimmer**;
- **Polarisationsfolie.** Einfache graue Folie liefert die besten Resultate; farbgetönte Folien sind ungeeignet. Sie finden Angebote im Internet unter dem Stichwort »Polfolie«. Achten Sie auf lineare, nicht zirkulare Polarisation. Sie müssen die Folie in sechs Quadrate mit je rund 5 Zentimeter Kantenlänge zerschneiden. Der Kasten auf S. 72 beschreibt, was Polarisatoren mit Photonen anstellen;
- einen **Laser,** zum Beispiel einen Laser-Zeigestab. Falls Ihr Gerät polarisiertes Licht emittiert, richten Sie seine Polarisation unter 45 Grad zur Vertikalen aus. Falls Ihr Laser nicht polarisiert ist, müssen Sie stets unmittelbar nach dem Laser einen Polarisator unter 45 Grad einrichten. Verwenden Sie ein Gummiband, um den Laser dauerhaft einzuschalten;
- ein dünnes, gerades **Stück Draht,** beispielsweise eine gerade gebogene Büroklammer. Je dünner der Draht, desto besser;
- ein **Stück Alufolie** und eine **Nadel,** um ein feines Loch hineinzustechen. Das durch das Loch austretende Licht bildet einen schmalen, kegelförmigen Strahl. Das Loch macht die Muster schwächer, verbessert aber die Resultate, sofern das Zimmer dunkel genug ist;
- einige **Ständer,** um den Laser und die Polarisationsfilter zu fixieren. Einfachste Haltevorrichtungen wie Klammern und Schachteln genügen;
- einen **Schirm,** um die erzeugten Muster darzustellen. Die nackte Wand reicht aus, wenn sie glatt und eben ist; ansonsten verwenden Sie ein Blatt Papier.

Ein Quantenradierer für den Hausgebrauch

Die hier beschriebenen Schritte skizzieren, welche Effekte man mit dem Quantenradierer beobachten kann. Im Internet finden Sie unter www.sciam.com/ontheweb in englischer Sprache eine genauere Beschreibung und zusätzliche Informationen über die Grundlagen der Interferenz von Wellen.

FOTO: LASERAUFBAU: BRIAN MARANAN PINEDA; FOTOS: LICHTMUSTER: RACHEL HULMER; GRAFIKEN: MATT COLLINS

1 Interferenzstreifen

- Wickeln Sie die Alufolie um die Austrittsöffnung des Lasers und stechen Sie mit der Nadel ein kleines Loch hinein, um einen feinen Lichtstrahl zu erzeugen.
- Platzieren Sie den Laser mindestens zwei Meter vom Schirm entfernt. Er sollte auf dem Schirm einen kreisförmigen Lichtfleck erzeugen.
- Platzieren Sie den Draht vertikal in der Mitte des Lichtstrahls.

Was geschieht: Wie gezeigt, sollten Sie ein Interferenzmuster aus hellen und dunklen Streifen sehen. Das Muster entsteht, weil das Licht, das links am Draht vorbeigeht, sich mit dem rechts vorbeigehenden überlagert. Wenn Sie ein Stück Papier knapp hinter den Draht halten, sehen Sie zwei Lichtflecke zu beiden Seiten des Drahtschattens. Die Flecke vergrößern und überschneiden sich immer mehr, je näher sie dem Schirm kommen. Von jedem einzelnen Photon, das im Überlappungsgebiet den Schirm erreicht, lässt sich nicht sagen, ob es links oder rechts am Draht vorbeigegangen ist; die Überlagerung der beiden Wege verursacht die Interferenzstreifen. Obwohl Sie Billionen Photonen betrachten, interferiert jedes einzelne nur mit sich selbst.

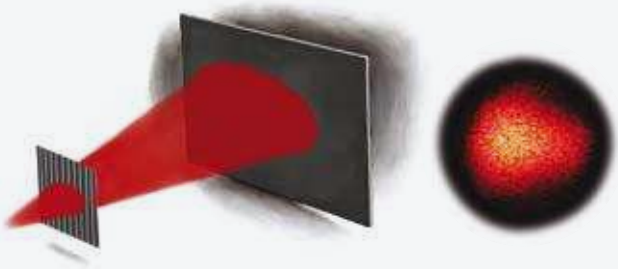
Das Foto zeigt die tatsächlich sichtbaren Interferenzstreifen. In den farbigen Schemazeichnungen sind die Größe und andere Details des Musters übertrieben dargestellt.

2 Markieren des Weges

- Nehmen Sie zwei Polarisatoren aus Polfolie und drehen Sie den einen so, dass die Polarisationsachsen zueinander rechtwinklig stehen. Das erkennen Sie daran, dass beide Polarisatoren, wenn sie vorübergehend übereinandergelegt werden, im Überlappungsgebiet kein Licht mehr durchlassen.
- Kleben Sie die Polarisatoren exakt nebeneinander, ohne Fuge oder Überlappung. Platzieren Sie die Klebstreifen nur ganz oben und unten, damit diese das Licht nicht blockieren. Sie fungieren als Wegmarkierer.
- Stellen Sie den Markierer so in den Strahl, dass die lotrechte Verbindungskante des Markierers sich direkt hinter dem Draht befindet. Am einfachsten ist es, den Draht am Markierer zu befestigen. Draht und Markierer werden im weiteren Experiment nicht mehr bewegt. Wir behaupten, dass der linke Polarisator vertikal polarisiertes Licht (V) erzeugt, der rechte horizontal polarisiertes (H). Das ist willkürlich; wir könnten diese Etiketten genauso gut vertauschen.

Was geschieht: Obwohl das Licht weiterhin beide Seiten des Drahts passiert, müssten die Streifen jetzt verschwunden sein. Wenn ein Photon den Schirm erreicht, nachdem es links am Draht vorbeigegangen ist, kommt es V-polarisiert an; ging es rechts vorbei, dann ist es nun H-polarisiert. Damit hat der Markierer Information über den von jedem Photon eingeschlagenen Weg zugänglich gemacht. Das verhindert Interferenz.

3 Auswahl der links vorbeigehenden Photonen



▶ Platzieren Sie einen dritten Polarisator (den »Analysator«) in V-Stellung zwischen den Markierer und den Schirm.

Was geschieht: Der Analysator blockiert alle rechts vorbeigehenden (und vom Markierer H-polarisierten) Photonen und lässt alle links vorbeigehenden durch. Das Muster ist nun schwächer und rechts kürzer, es besteht nur aus dem linken Lichtfleck. Mit dem Analysator verschaffen Sie sich die vom Markierer zugänglich gemachte Information: Sie wissen, dass alle Photonen auf dem Schirm links am Draht vorbeigegangen sind.

4 Auswahl der rechts vorbeigehenden Photonen

▶ Drehen Sie den Analysator in die H-Stellung.

Was geschieht: Der H-Analysator blockiert den linken Lichtfleck und lässt nur den rechten Fleck durch. Wenn man die Lichtintensität (die Anzahl der Photonen) auf dem Schirm messen könnte, würde man herausfinden, dass das Licht in Schritt 2 genau die Summe des Lichts in den Schritten 3 und 4 ist. Man beachte: In Schritt 2 traten keine Streifen auf, obwohl die Polarisation der Photonen nicht festgestellt wurde; die bloße Möglichkeit reichte aus, wie in den Schritten 3 und 4.

5 Ausradieren der Weginformation

▶ Drehen Sie den Polarisator von der V-Stellung um 45 Grad im Uhrzeigersinn in die diagonale D-Stellung.

Was geschieht: Die Streifen tauchen wieder auf! Der Polarisator radiert die Information über den Weg jedes Photons aus. Links vorbeigehende V-Photonen haben eine Chance von 50 Prozent, den Schirm zu erreichen; rechte H-Photonen ebenso. Durchgelassene Photonen werden D-polarisiert; der Weg jedes Photons ist unbekannt. Jedes nimmt anscheinend beide Wege zugleich und interferiert mit sich selbst.

6 Der Anti-Radierer

▶ Drehen Sie den Polarisator von der V-Stellung gegen den Uhrzeigersinn in die antidiagonale A-Stellung.

Was geschieht: Wiederum gibt es Streifen; das in Schritt 5 Gesagte gilt auch für einen A-polarisierten Radierer. Doch die Streifen sind in beiden Fällen leicht gegeneinander verschoben. Die A-Streifen sind hell, wo die D-Streifen dunkel sind, und umgekehrt. Könnte man die Intensitäten oder Photonenzahlen des D- und des A-Radierers addieren, ergäbe die Summe den Fleck von Schritt 2, ohne sichtbare Interferenz.

7 Beide Radierer auf einmal

▶ Schneiden Sie einen D- und einen A-Polarisator waagrecht mittendurch.
▶ Verbinden Sie die obere D-Hälfte mit der unteren A-Hälfte.
▶ Platzieren Sie diesen Hybrid-Analysator in den Strahl.

Was geschieht: In der oberen Hälfte des Lichtflecks auf dem Schirm erscheinen D-Streifen, in der unteren Hälfte A-Streifen. Das Muster ähnelt ein wenig einem schiefen Gebiss und verdeutlicht, wie die dunklen und hellen Streifen jedes Radierers einander entsprechen.

Schlussfolgerung

Was widerfuhr den Photonen in den unterschiedlichen Schritten?

▶ In den Schritten 3 und 4 lief jedes Photon entweder an der einen oder der anderen Seite des Drahts vorbei – es gab keine Interferenz. In Schritt 1, 5, 6 und 7 nahmen die Photonen anscheinend beide Wege zugleich und erzeugten Interferenz.
▶ Unsere Interpretation hängt davon ab, was mit den Photonen später geschah – ob sie einem Analysator, einem Radierer oder nur dem Schirm begegneten.
▶ Die Schritte 6 und 7 zeigen, dass die Welcher-Weg-Information auf unterschiedliche Weise ausradiert werden kann, wobei entweder das ursprüngliche oder das inverse Interferenzmuster erzeugt wird.

▷ lenförmiges Verhalten, wenn wir das nicht tun.

Ein Standardnachweis dieses Welle-Teilchen-Dualismus beruht auf dem Doppelspaltversuch; unser Quantenradierer zum Selbstmachen ähnelt diesem Experiment insofern, als ebenfalls zwei Wege im Spiel sind, wenn auch nicht zwei Spalte. Beim Doppelspaltversuch emittiert eine Quelle Teilchen, die zunächst auf einen Schirm mit zwei Schlitzen treffen. Die durchgelassenen erreichen dann einen zweiten Schirm, und dort erzeugt jedes einen winzigen Fleck. Wo einzelne Teilchen landen, bleibt bis zu einem gewissen Grad zufällig und unvorhersagbar, aber Tausende solcher Flecken summieren sich zu einem bestimmten, vorhersagbaren Muster. Wenn die Bedingungen so sind, dass die Teilchen sich als Wellen verhalten, entsteht ein Interferenzmuster – eine Abfolge von unscharfen Streifen, in denen die meisten Teilchen auftreffen, während nur sehr wenige in den Zwischenräumen landen.

Die Teilchen erzeugen das Interferenzmuster nur, wenn jedes durch jeden der beiden Spalte gegangen sein könnte und wenn nicht festzustellen ist, durch welchen. In diesem Fall gelten die beiden Wege als ununterscheidbar, und jedes Teilchen verhält sich, als hätte es tatsächlich beide Schlitze passiert. Gemäß der gängigen Deutung der Quantenmechanik tritt Interferenz ein, wenn ununterscheidbare Alternativen in dieser Weise kombiniert werden.

Die zwei Wege der Katze um den Baum

Falls zwei oder mehr Alternativen koexistieren, spricht man von Superposition. Erwin Schrödinger unterstrich 1935 die Eigentümlichkeit von Quantensuperpositionen durch sein Gedankenexperiment mit der zugleich lebenden und toten Katze, deren Zustand in einer Kiste nicht beobachtet werden kann. Tritt Quanteninterferenz ein, ähnelt manches an unserem Experiment diesem Beispiel. Statt zugleich lebendig und tot zu sein, geht unsere Katze zugleich links und rechts an einem Baum vorbei.

Schauen wir in die Kiste, hört Schrödingers Katze auf, als Superposition zu existieren: Wir sehen stets entweder ein lebendes oder ein totes Tier. Allerdings besagen manche Deutungen der Quantenmechanik, dass nun wir zu einer Superposition der zwei Alternativen werden, eine tote oder eine lebende Katze gesehen zu haben. Wenn in unserem Fall der Baum von einer Taschenlampe beleuchtet wird, sehen wir die Quantenkatze auf der einen oder der anderen Seite daran vorbeischleichen. Ebenso können wir ein Messgerät hinzufügen, um jedes Teilchen beim Durchgang durch die Spalte zu beobachten. Man könnte sich vorstellen, dass Licht so auf die Schlitze fällt, dass wir einen von jedem passierenden Teilchen gestreuten Lichtblitz sehen, der uns Auskunft über den Teilchenweg gibt. Der Blitz macht die zwei alternativen Wege unterscheidbar, zerstört dadurch die Superposition, und die Partikel bilden auf dem Schirm nicht ein Streifenmuster, sondern einen strukturlosen Fleck. Solche Experimente sind durchgeführt worden – tatsächlich ergibt sich kein Interferenzmuster.

Wir müssen nicht »wirklich nachschauen« und brauchen die Lichtblitze nicht zu registrieren und festzustellen, welchen Weg jedes Teilchen eingeschlagen hat. Es genügt, dass die Information in den Blitzen zugänglich ist und direkt hätte beobachtet werden können.

Indem der Quantenradierer die Information »ausradiert«, die den Weg jedes Teilchens beschreibt, stellt er die Ununterscheidbarkeit der Alternativen wieder her – und somit die Interferenz.

Wie Polarisationsfilter auf Photonen wirken

Die Polarisationsfolie lässt nur Licht durch, das parallel zur Polarisationsachse oszilliert; die Achse wird in unseren Schemazeichnungen durch parallele Linien auf der Folie angezeigt. Wenn wir uns Licht einfach als Welle auf einem zwischen zwei Leuten gespannten Seil vorstellen, dann kann die Welle das Seil nach oben und unten, nach links und rechts oder unter jedem Winkel dazwischen bewegen. Der Oszillationswinkel ist die Polarisation der Welle.

Die Folie wirkt wie ein Raster aus parallelen Stäben, zwischen denen das Seil hindurchgeführt wird. Parallel zum Raster polarisierte Wellen passieren ungehindert, senkrecht dazu polarisierte werden blockiert, und andere Winkel gelangen mit verringerter Amplitude hindurch. Die Welle, die den Polarisator verlässt, ist immer parallel zu dessen Achse polarisiert.

Die quantenmechanische Beschreibung klingt ähnlich: Licht besteht aus einzelnen Partikeln namens Photonen, die wie eine Welle jeweils eine Schwingungsrichtung haben können. Ein Photon wird immer dann durchgelassen, wenn die Achse des Polarisators parallel zur Polarisation des Photons steht. Ein senkrecht dazu stehender Polarisator blockiert das Photon immer. Bei einem Winkel von 45 Grad hat das Photon eine 50-prozentige Chance durchzukommen; die exakte Wahrscheinlichkeit variiert mit dem Winkel. Nach Verlassen des Polarisators ist das Photon stets parallel zu dessen Achse polarisiert.

Licht kann auch unpolarisiert sein, das heißt, seine Photonen haben zufällige Polarisationsrichtungen. In diesem Fall gelangt die Hälfte der Photonen durch den Polarisator; sie sind dann parallel zu ihm polarisiert.

Sie können prüfen, wie die Polarisatoren wirken, indem Sie zwei aufeinanderlegen. Während Sie den einen langsam drehen, können Sie gut hindurchsehen, sofern beide Polarisationsachsen übereinstimmen; bei anderen Winkeln trübt sich das Bild, und wenn die Achsen senkrecht stehen, können Sie praktisch nicht hindurchsehen. Photonen, die durch den ersten Polarisator gelangen, werden entsprechend polarisiert, und dann hängt die Wahrscheinlichkeit, mit der sie durch den zweiten kommen, vom Winkel zwischen ihrer Polarisation und dessen Achse ab.

Ein interessanter Effekt tritt ein, wenn zwei Polarisatoren zueinander senkrecht stehen und ein dritter unter einem Winkel – am besten 45 Grad – dazwischen platziert wird. Durch Einfügen des dritten Polarisators werden die gekreuzten Polarisatoren ein wenig lichtdurchlässig, obwohl man erwarten würde, er wirke als zusätzliches Hindernis. Der Effekt erklärt sich, wenn man die Wirkung eines Polarisators nach dem anderen überlegt (siehe www.sciam.com/ontheweb). Auch der selbst gebaute Quantenradierer beruht auf einem 45-Grad-Polarisator, der das Verhalten des Lichts ändert.

Aber wie kann ein Radierer das? Angenommen, der Lichtblitz, der von jedem Teilchen gestreut wird, ist nur ein einzelnes Photon. Damit das Photon die Welcher-Weg-Information des Teilchens enthüllt, muss sich – wenigstens im Prinzip – angeben lassen, von welchem Spalt das Photon ausging. Das heißt, wir müssen den Ort, von dem aus jedes Photon gestreut wurde, exakt genug messen können, um die Spalte zu unterscheiden. Das Heisenberg'sche Unbestimmtheitsprinzip besagt nun: Wenn wir stattdessen den Impuls jedes Photons mit großer Genauigkeit messen, werden die Orte der Photonen weniger scharf definiert. Wenn wir also die Photonen durch eine Linse schicken, die uns Information über ihre Impulse zugänglich macht, wird die Information über ihre Orte ausradiert. In diesem Fall sind die zwei Wege, denen die Teilchen folgen können, wieder ununterscheidbar und die Interferenz wird wiederhergestellt.

Zunächst einmal halten wir inne und denken ein bisschen mehr über den eben beschriebenen Radiervorgang nach, denn darin steckt die Seltsamkeit. Wenn wir den Ort nachweisen, an dem eines der Photonen gestreut wurde, erfahren wir, durch welchen Spalt das zugehörige Teilchen gegangen ist; das heißt, das Teilchen passierte tatsächlich den einen oder den anderen Spalt, nicht beide. Wenn wir andererseits den Impuls des Photons nachweisen, können wir nicht wissen, welchen Schlitz das Teilchen durchquert hat. Positiv ausgedrückt: Wenn wir viele Impulsmessungen ausführen und ein Interferenzmuster sehen, schließen wir daraus, dass in solchen Fällen die Teilchen beide Schlitze passiert haben – andernfalls wäre Interferenz unmöglich.

Demzufolge hängt die Antwort auf die Frage »Ging das Teilchen durch einen Spalt oder durch beide Spalte?« davon ab, was wir mit dem zugehörigen Photon lange nach dem Durchgang des Teilchens anstellen. Es ist fast, als würde unsere Behandlung der Photonen etwas beeinflussen, was sich in vergangenen Ereignissen abgespielt hat. Wir können herausfinden, durch welchen Spalt das Teilchen ging – oder wir können diese Information mit dem Quantenradierer aus dem Universum löschen.

Besonders seltsam ist, dass wir uns entscheiden dürfen, welche Messung wir durchführen, nachdem das Teilchen bereits die Schlitze passiert hat. Wir können den Apparat für beide alternative Messungen präparieren, mit einem Schalter, den wir erst knapp vor Ankunft jedes Photons betätigen. Physiker nennen diese Variante ein *delayed-choice experiment* (Experiment mit verzögerter Wahl). Die Idee hatte John A. Wheeler von der Universität von Texas in Austin im Jahr 1978; sie erweitert ein Gedankenexperiment, das Niels Bohr und Albert Einstein 1935 in ihrer berühmten Debatte über Quantenmechanik und Realität verwendeten.

Aufmerksame Leser erkennen hier ein Problem: Warum können wir die Wahl unserer Photonenmessung nicht aufschieben, bis wir bereits gesehen haben, ob die Partikel ein Interferenzmuster bilden? Das ließe sich erreichen, indem wir den Auffangschirm nicht allzu weit vom Doppelspalt und den Photonendetektor viel weiter entfernt platzieren. Was ▷

WISSEN
WAS HEUTE WICHTIG IST

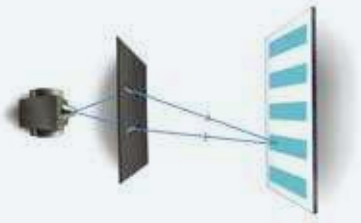
Die Redaktion von spektrumdirekt informiert Sie schnell, fundiert und verständlich über den Stand der Forschung.

www.spektrumdirekt.de/heute

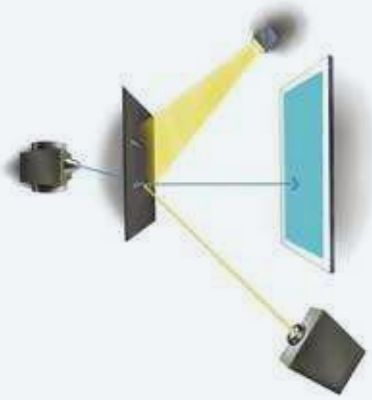
spektrumdirekt
Die Wissenschaftszeitung im Internet

Wie ein Quantenradierer funktioniert

Das Verhalten von Quantenpartikeln kann davon abhängen, welche Information über sie zugänglich ist. Ein Quantenradierer eliminiert Information und stellt dadurch das Phänomen der Interferenz wieder her. Das lässt sich am besten anhand eines Doppelspaltexperiments verstehen.



Erzeugung von Quanteninterferenz
Werden Teilchen durch zwei Spalte geschickt, erzeugen sie Interferenzstreifen, da sie vorwiegend in bestimmten Gebieten auf einem Schirm auftreffen (blau), aber kaum dazwischen (weiß). Das Interferenzmuster erscheint, wenn jedes Teilchen auf seinem Weg zum Schirm beide Spalte hätte passieren können (Pfeile).



Verhindern der Interferenz
Die Streifen treten nicht auf, wenn die Teilchen mit etwas wechselwirken, das benutzt werden könnte, um den Ort jedes Teilchens an den Spalten festzustellen. Zum Beispiel könnte ein Lichtquant (gelbe Linie) am Teilchen gestreut werden und enthüllen, dass es den rechten Spalt passiert hat. Das Photon muss gar nicht nachgewiesen werden – es genügt, dass die Welcher-Weg-Information im Prinzip verfügbar ist.

GRAFIKEN: MATT COLLINS

Der Radierer stellt die Interferenz wieder her
Ein Quantenradierer löscht die Welcher-Weg-Information. Wenn das Teilchen ein Photon streut, könnte eine Linse die Feststellung unmöglich machen, von welchem Spalt das Photon gekommen ist. In diesem Fall geht das zugehörige Teilchen anscheinend durch beide Spalte wie zuvor, und Interferenzstreifen treten auf. Das Seltsamste am Quantenradierer ist, dass das Verhalten des Teilchens an den Spalten davon abzuhängen scheint, was mit dem Photon geschieht, nachdem das Teilchen den Spalt – beziehungsweise die Spalte – passiert hat.

▷ geschähe, wenn wir sähen, dass die Teilchen Interferenzstreifen bilden, und wir erst dann Photonen-Ortsmessungen machten, die das Entstehen solcher Streifen verhindern sollten? Wir können nicht erwarten, dass das bereits registrierte Interferenzmuster verschwindet! Deshalb sollten sich mit dem Effekt der verzögerten Wahl Botschaften augenblicklich über beliebige Entfernungen übertragen lassen – das heißt mit Überlichtgeschwindigkeit!

Ein kniffliges Detail, das wir anfangs unterschlagen haben, bewahrt vor solchen Verwicklungen. Um die Interferenz der Teilchen nach Anwendung des Quantenradierers zu sehen, müssen wir sie zuerst in zwei Gruppen teilen und diese separat beobachten.

Die eine Gruppe wird das ursprüngliche Streifenmuster zeigen, die andere hingegen das dazu inverse Muster – das heißt, die Teilchen der zweiten Gruppe landen dort, wo ursprünglich die dunklen Zwischenräume lagen, und meiden die Orte der ursprünglich hellen Streifen. Beide Gruppen zusammen füllen sämtliche Lücken und verbergen die Interferenz.

Das Paradox wird vermieden, weil wir die Daten der Photonenmessung brauchen, um zu wissen, zu welcher Gruppe jedes Teilchen gehört. Darum können wir die Interferenzstreifen erst beobachten, nachdem wir die Photonenmessungen durchgeführt haben, denn erst dann wissen wir, wie wir die Teilchen in Gruppen aufteilen sollen.

In unserem Experiment für den Hausgebrauch geschieht das Aufteilen der Teilchen in Gruppen automatisch, weil die eine Gruppe durch einen Polarisationsfilter blockiert wird; man sieht das Interferenzmuster der durchgelassenen Gruppe mit bloßem Auge. Im letzten Schritt können Sie die Interferenzmuster der beiden Gruppen direkt nebeneinander beobachten.

Vom praktischen Standpunkt ist es enttäuschend, dass man mit Überlichtgeschwindigkeit keine Botschaften senden kann. Physiker und Logiker sind darüber jedoch erleichtert, denn so werden Paradoxien vermieden. ◁

Rachel Hillmer arbeitet an neuen Methoden, Quanteninformation mit Licht zu kodieren. Sie studiert bei **Paul Kwiat**, der Professor für Physik an der Universität von Illinois in Urbana-Champaign ist. Er erforscht Quantenradierer und optische Quantenprogrammierung.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Quantenradierer. Von Stephen P. Walborn et al. in: Spektrum der Wissenschaft 2/2004, S. 32

Quantum-erasing the nature of reality, or perhaps, the reality of nature? Von P. G. Kwiat and B.-G. Englert in: Science and Ultimate Reality: Quantum Theory, Cosmology, and Complexity. Von John D. Barrow, Paul C. W. Davies und Charles L. Harper jr. (Hg.). Cambridge University Press, 2004

Quantitative wave-particle duality and nonerasing quantum erasure. Von P. D. D. Schwindt, P. G. Kwiat und B.-G. Englert in: Physical Review A, Bd. 60, S. 4285, 1999

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/874881.

1957

Elektrischer Stuhl für Unkraut

»Unkrautbekämpfung mittels Elektrizität ist eine neue Methode, die sich allerdings zur Zeit noch im Versuchsstadium befindet. Verwendet werden 1000 bis 3000 Volt Gleich- oder Wechselstrom. Eine Elektrode wird in die Erde gesteckt, mit der zweiten wird die Unkrautpflanze berührt. Infolge des hochfrequenten Stromes kommt es zu augenblicklichen Gewebeschäden, die den Tod der Pflanze herbeiführen. Eine weitere Anwendungsmöglichkeit dieser ›gezielten Methode‹ ist das Abtöten von holzzerstörenden Insekten im Bau- und Nutzholz.« *Wissen und Leben, 2. Jg., Heft 7, S. 558, Juli 1957*

▲ Erste Hilfe auf dem Zahnarztstuhl

Aufblasbares Flugzeug

»Ein aufblasbares Rettungsflugzeug, das aus der Luft abgeworfen werden kann und zur Befreiung von in einsamen Gegenden notgelandeten Piloten vorgesehen ist, wurde von der ›Goodyear Aircraft Corporation‹ in Zusammenarbeit mit dem ›US-Amt für Marineforschung‹ entwickelt. Das Flugzeug besteht aus einem leicht faltbaren Material sowie einem 45-PS-Motor, der der Maschine eine Geschwindigkeit von 96 km/st verleiht. Der Flugkörper selbst kann innerhalb 18 Minuten mit Luft aufgefüllt werden. Die Maschine, die bei Versuchsflügen eine Höhe von rund 1700 Metern erreichte, kann eine Person aufnehmen.« *Industriekurier, 10. Jg., Nr. 105, S. 343, Juli 1957*

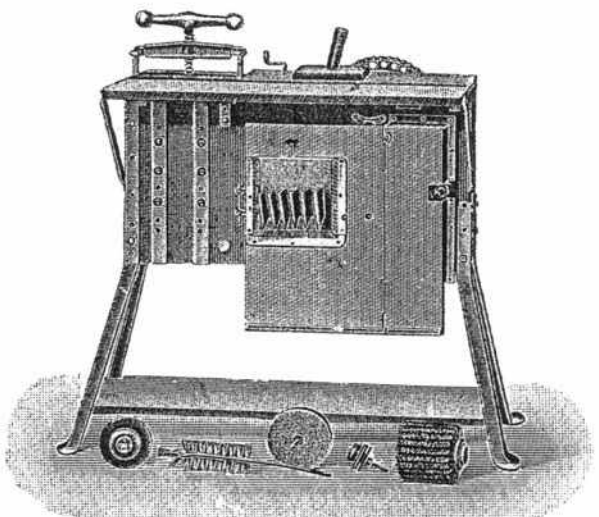
Menschliche Ziehharmonika

»Kommt es zum Atemstillstand, während der Patient in einem Behandlungsstuhl sitzt, muß er, um die … künstliche Beatmung anwenden zu können, in eine waagerechte Lage gebracht werden. Das ist nicht immer einfach, und in jedem Fall wird Zeit verloren. Eine neue … Methode, die im Sitzen angewandt werden kann, verdient besonderes Interesse … Sie besteht darin, daß der Helfer den Oberkörper des Bewußtlosen nach vorn gegen die Oberschenkel preßt. Durch Zusammendrücken des Bauchraumes wird das Zwerchfell emporgetrieben und eine Ausatmung bewirkt. Unterbricht man den Druck, sinkt das Zwerchfell zurück und es kommt zur Einatmung.« *Umschau, 57. Jg., Heft 13, S. 408, Juli 1957*

Schuhe putzen mit der Kaffeemühle

»Eine sehr praktische Idee ist in der Universal-Küchenmaschine ›Artifex Decemplex‹ der Maschinenfabrik Gebrüder Blaufuss in Meiningen verwertet worden. … Ihrer Konstruktion nach ist sie eine Kombination sämtlicher im Haushalt gebräuchlichen Apparate, nämlich Reibmaschine, Presse, Schneidemaschine, Flaschenspüler, Messer- und Gabelputzmaschine, Kaffeemühle und last not least auch eine Schuhwichsmaschine. … Um mit der Reibmaschine zu arbeiten, hebt man den Holzstössel an, nachdem man die betreffende Substanz in den Raum eingeführt hat, und setzt den Antrieb des Kettenrades durch Rechtsdrehung der Kurbel in Bewegung.« *Deutsche Export-Revue, 7. Jg., Nr. 7, S. 325, Juli 1907*

▼ »Artifex Decemplex« – das Küchenwunder aus Meiningen



1907

Kunstschatz aus dem Meer

»Ein archäologischer Fund ist nach Berichten aus Tunis an der dortigen Küste gemacht worden. Der Taucher eines Schwämme fischenden Bootes fand in der Nähe von Mahdia auf dem Meeresgrund Statuen aus Bronze und Marmor. Es gelang, einige zu bergen und nach Sfax zu schaffen, wo sie näherer Untersuchung unterzogen werden sollen. Man nimmt an, daß die Statuen aus einem an der Küste befindlichen und mit der Zeit versunkenen Tempel stammen. Es spricht dafür, daß die Bildwerke inmitten von Mauerresten lagen.« *Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Nr. 127, S. 32, Juli 1907*

Buntes unterm Mikroskop

»Die erste wissenschaftliche Anwendung der Farben-Photographie (nach dem Lumièreschen Verfahren) und zwar auf dem Gebiete der Mikrophotographie, erfolgte im Collège de France im Laboratorium für pathologische Physiologie. François Franck legte der Académie des Sciences einige Klischees farbiger Mikrophotographien vor, die in 30- bis 1000facher Vergrößerung alle farbigen Einzelheiten der photographierten Präparate wiedergeben. Besonderes Interesse erregten die Photographien … von Schnitten durch die Wirbelsäule, durch die Eingeweide eines Frosches, durch das Herz eines Kaninchens usw.« *Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Nr. 126, S. 24, Juli 1907*

Volltanken mit Wasserstoff

Forscher entwickeln derzeit Speicher, um Brennstoffzellen mit ausreichend Wasserstoff für Langstreckenfahrten per Autos versorgen zu können. Trotz zahlreicher Fortschritte erscheint der Weg zu einem breiten Einsatz jedoch noch weit.

Von Sunita Satyapal, John Petrovic und George Thomas

An einem Spätsommertag 1783 in Paris vollbrachte Jacques Charles etwas Erstaunliches. Er erhob sich rund tausend Meter über den Boden – in einem Ballon aus Seide. Dieser war mit Gummi beschichtet und mit Wasserstoff gefüllt; das Gas – leichter als Luft – gab ihm Auftrieb. Kurz nach der Landung zerstörten verschreckte Kleinbauern den Ballon. Doch Jacques Charles hatte damit eine Idee in die Welt gesetzt, die auch heute noch, über zwei Jahrhunderte danach, Forscher brennend beschäftigt: Wie lässt sich die Kraft des Wasserstoffs – des leichtesten Elements im Universum – für Transporte nutzen?

Wasserstoff, ob direkt verbrannt oder in Brennstoffzellen verbraucht, bietet für zukünftige Fahrzeuge interessante Antriebsoptionen. Die heimische Industrie kann Wasserstoff herstellen, entweder aus chemischen Grundstoffen oder mittels Elektrolyse, etwa mit Strom aus erneuerbaren, nuklearen oder fossilen Energiequellen. Das transparente Gas ist ungiftig und kann – praktisch ohne Umweltverschmutzung – als Kraftstoff für Antriebstypen dienen. Bei seiner Verbrennung entsteht kein Kohlendioxid, das als Treibhausgas das Klima schädigen könnte. Und wird Wasserstoff in eine Brennstoffzelle geleitet – eine batterieartige Zelle, die durch so genannte kalte Verbrennung aus Wasserstoff und Sauerstoff Elektrizität erzeugt –, kann der Strom Elektromotoren antreiben. Als Reaktionsprodukte entstehen lediglich Wasser und Wärme (siehe »Weichen stellen für den Wasserstoff«, SdW 6/2005, S. 86). Brennstoffzellenautos könnten mehr als doppelt so effizient sein wie normale Fahrzeuge. Damit würde Wasserstoff dazu beitragen, ökologische und gesellschaftliche Probleme zu mildern oder zu lösen – bei der Luftverschmutzung, Gesundheitsproblemen, dem Klimawandel oder dem Ölverbrauch.

Doch bis zum »Volltanken mit Wasserstoff« ist es noch ein weiter Weg. Obwohl Wasserstoff pro Gewichtseinheit dreimal so viel Energie enthält wie Benzin, ist es bislang unmöglich, das Gas so kompakt und einfach zu speichern wie herkömmlichen Treibstoff. Daher ist es eine der technisch größten Herausforderungen, Wasserstoff ausreichend sicher und effizient im Auto unterzubringen. Für den Speicher müssen die Forscher erst noch einen praktikablen Kompromiss entwickeln. Einerseits soll der Tank Wasserstoff für eine Reichweite von mindestens 500 Kilometern fassen. Andererseits darf er im Kofferraum oder Fahrzeuginneren nicht zu viel Platz beanspruchen. Um zügig beschleunigen zu können, muss er das Gas schnell genug freisetzen, und das alles natürlich im üblichen Temperaturbereich. Außerdem ▷

In Kürze

- Wasserstoff wird zumeist unter hohem Druck bei Umgebungstemperatur gespeichert. Doch das Speichervermögen solcher Tanks ist noch zu klein. Behälter für flüssigen Wasserstoff, die **auf sehr tiefe Temperaturen** gekühlt werden müssen, haben ebenfalls Nachteile.
- Noch fehlen **Wasserstofftanks**, die Brennstoffzellenautos eine Reichweite von 500 Kilometern ermöglichen.
- Forscher arbeiten zurzeit an alternativen Konzepten zur hoch verdichteten Wasserstoffspeicherung, doch ein **Durchbruch lässt auf sich warten.**

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Noch ist es nicht möglich, Wasserstoff in einem Speicher mit dem üblichen Volumen eines Benzintanks unterzubringen.

KENN BROWN

▷ sollte er sich in wenigen Minuten auftanken lassen und auch preislich konkurrenzfähig sein. Heutige Wasserstoffspeicher erfüllen diese Anforderungen noch lange nicht.

Weltweit bemühen sich Forscher aus Autoindustrie, von Behörden und Universitäten, diese Beschränkungen zu überwinden. Die größte internationale Gruppe, die sich mit Wasserstoffspeicherung beschäftigt, entstand 1977 mit dem Hydrogen Implementation Agreement (Vereinbarung zum Wasserstoffeinsatz) der Internationalen Energieagentur IEA in Paris. Mehr als 35 Forscher aus 13 Ländern sind derzeit daran beteiligt. Der 2003 gegründeten Internationalen Partnerschaft für die Wasserstoffwirtschaft, die Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie fördert, traten bislang 17 Nationen bei. Und im Jahr 2005 rief das US-Department of Energy (DOE) das National Hydrogen Storage Project (Nationales Wasserstoffspeicherprojekt) ins Leben. Es umfasst drei Forschungszentren sowie zahlreiche Arbeitsgruppen aus Industrie, Universitäten und staatlichen Forschungslabors – sowohl in der Grundlagen- als auch in der angewandten Forschung.

Allein letztes Jahr wurden im Rahmen dieses Projekts in den USA 30 Millionen Dollar für über 80 Forschungsvorhaben bewilligt. Derzeit verhindern die zahlreichen ungelösten Probleme den größeren Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen. Tag für Tag verbrauchen allein die Kraftfahrzeuge in den USA 1,45 Milliarden Liter Benzin (jährlich rund 530 Milliarden Liter), was etwa zwei Dritteln des gesamten US-Ölverbrauchs entspricht. Mehr als die Hälfte muss von den USA importiert werden. Natürlich wäre es teuer, die amerikanische Autoindustrie für die Produktion von Brennstoffzellenfahrzeugen umzurüsten und das Tankstellennetz auf Wasserstoffbetrieb umzustellen. Diese Vehikel müssten aber zudem noch so kostengünstig und zuverlässig werden, dass sie mit herkömmlichen Autos konkurrieren können – bei ähnlichen Fahrleistungen. Dabei sollten auch Sicherheitsbedenken ausgeräumt werden. Noch erinnern sich beim Thema Wasserstoff nicht wenige an das Unglück des Zeppelins »Hindenburg« im Jahr 1937– obwohl die Fachleute heute überzeugt sind, dass die leicht brennbare Außenhaut des Luftschiffs ein wichtiger Faktor beim Ausbruch des Feuers war.

Noch erinnern sich beim Wasserstoff viele an das Unglück des »Hindenburg«-Zeppelins von 1937

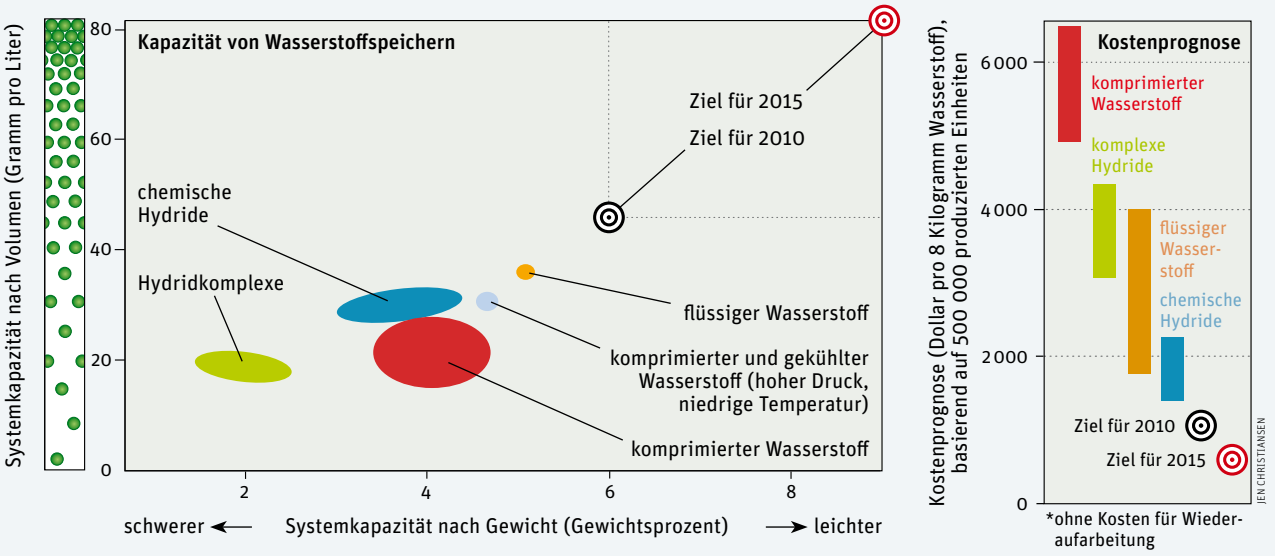
Warum ist es so schwierig, eine ausreichende Menge Wasserstoff in ein Auto zu packen? Bei Raumtemperatur und Normaldruck (von einem Bar) ist Wasserstoff ein Gas, dessen Energiedichte 3000-mal niedriger ist als die von Benzin. Ein 80-Liter-Tank mit Wasserstoff bei Normaldruck könnte einen Pkw gerade einmal 150 Meter weit bewegen. Deshalb müssen Ingenieure in jedem Fall die Dichte des Wasserstoffs im Tank drastisch erhöhen.

Eine Mindestreichweite von 500 Kilometern ist heute als Ziel der FreedomCAR and Fuel Partnership vorgegeben – einem Konsortium aus Industrie und US-Regierung zur Entwicklung fortgeschrittener Technologien für zukünftige Fahrzeuge. Ingenieure legen eine einfache Faustregel zu Grunde: 3,8 Liter Benzin (eine US-Gallone) enthalten die Energie von einem Kilogramm Wasserstoff. Während heutige US-Autos für 500 Kilometer im Schnitt etwa 75 Liter Benzin benötigten, würde ein typisches Brennstoffzellenauto rund acht Kilogramm Wasserstoff brauchen – je nach Fahrzeugtyp und -größe etwas mehr oder weniger.

Für 2010 – frühestens dann rollen erste Serienautos mit Brennstoffzellen vom Fließband – haben sich die Forscher ein realistisches Etappenziel gesetzt. Sie vergleichen die Ergebnisse einer Reihe von Speichertechnologien mit ihrer »Sechs-Gewichtsprozent«-Vorgabe – einem Tank, der gefüllt sechs Prozent seines Gesamtgewichts an Wasserstoff enthält. Ein insgesamt 100 Kilogramm schwerer Tank (für Autos noch ein vertretbares Gewicht) würde daher sechs Kilogramm Wasserstoff speichern. Obwohl sechs Prozent nicht gerade nach viel klingt, dürfte es äußerst schwierig werden, diese Zielvorgabe zu erreichen. Bei Tanks mit relativ niedriger Druckfestigkeit liegt die beste heute erreichte Quote unter zwei Prozent.

Das Speicherproblem

Ein Speichersystem für Wasserstoff sollte genügend Treibstoff für eine Reichweite von mindestens 500 Kilometern fassen können. Ein System, das bis zum Jahr 2010 sechs Prozent des Gewichts als Wasserstoff sowie 45 Gramm Wasserstoff pro Liter speichert, könnte die Anforderungen an Brennstoffzellenfahrzeuge der ersten Generation erfüllen (schwarzer Zielpunkt in der Grafik links). Noch bessere Speicherwerte müssten bis 2015 für eine breitere Fahrzeugpalette erreicht werden (roter Zielpunkt). Die Gewichtsangaben berücksichtigen auch das erforderliche Zubehör der Tanksysteme. So hat beispielsweise flüssiger Wasserstoff eine Dichte von 71 Gramm pro Liter. Aber zusammen mit Tank und anderem Zubehör fällt der Wasserstoffanteil unter 40 Gramm pro Liter. Um für Wasserstoffadsorber Speichervolumen oder Kosten anzugeben, ist es noch zu früh.



Noch schwieriger dürfte es werden, den Wasserstofftank so klein zu halten, dass er nicht mehr Platz einnimmt als ein typischer Benzintank. Denn ein Großteil des verfügbaren Platzes wird schon allein beansprucht von Behältern, Ventilen, Rohrleitungen, Reglern, Sensoren, Isolationsstoffen und allem anderen, was die Speicherung von sechs Kilogramm Wasserstoff erfordert. Schließlich muss ein praxistauglicher Tank den Wasserstoff schnell genug an die Brennstoffzelle abgeben, um dem Elektromotor eine Beschleunigung zu verleihen, wie es Fahrer heute erwarten.

Gegenwärtig speichern die meisten der vielen hundert Prototypen von Brennstoffzellenfahrzeugen ihren Wasserstoff in Hochdruckbehältern, die Druckluftflaschen von Tauchern ähneln. Mittels moderner Verbundtechnologie mit Kohlenstofffasern lassen sich stabile, leichte Tanks herstellen, die problemlos Wasserstoff mit einem Druck zwischen 350 und 700 Bar speichern können. Durch simple Druckerhöhung lässt sich die Dichte des Wasserstoffs allerdings nicht proportional steigern. Selbst bei 700 Bar erreicht die maximale Energiedichte mit 39 Gramm pro Liter gerade ▷

Zukünftige Tankstellen könnten Wasserstoff je nach Tanksystem in unterschiedlichen Varianten bereithalten.

15 Prozent des gleichen Benzinvolumens. Die heute benutzten Hochdrucktanks enthalten nur etwa 3,5 bis 4,5 Prozent ihres Gesamtgewichts an Wasserstoff (siehe Kasten rechts oben).

Diese Technologie würde sich für bestimmte Busse oder andere Großfahrzeuge eignen, die hinreichend große Wasserstofftanks mitführen könnten. In Autos hingegen ergäben sich Probleme. Außerdem wären die heutigen Kosten für solche Tanks um mindestens den Faktor zehn zu hoch. Verflüssigt man den Wasserstoff, dann erhöht sich die Energiedichte; im flüssigen Zustand ließe sich pro Volumeneinheit die größtmögliche Menge speichern. Wie jedes Gas wird Wasserstoff bei hinreichender Abkühlung flüssig, unter Luftdruck bei Temperaturen unterhalb –253 Grad Celsius. Flüssiger Wasserstoff erreicht eine Dichte von 71 Gramm pro Liter, das entspricht etwa 30 Prozent der Energiedichte von Benzin. Die mit solchen Systemen praktisch erzielbare Wasserstoffdichte hängt von den verwendeten Dämm- und Isolationsmaterialien ab (siehe Kasten rechts Mitte).

Flüssiger Wasserstoff hat aber auch Nachteile. Erstens erfordert sein niedriger Siedepunkt besondere Sicherheitsmaßnahmen und spezielle Kühlvorrichtungen. Außerdem müssen die Speicherbehälter wegen der niedrigen Temperaturen extrem gut isoliert werden. Schließlich erfordert die Verflüssigung von Wasserstoff mehr Energie als die Kompression bei hohem Druck. Dies erhöht die Kraftstoffkosten und reduziert die Effizienz solcher Tanksysteme.

Dennoch arbeitet die Automobilindustrie mit Hochdruck daran, Wasserstoffmodelle auf die Straße zu bringen. BMW will noch dieses Jahr den »Hydrogen 7« einführen. Er ist mit einem Verbrennungsmotor ausgestattet, der sowohl mit Benzin (für rund 500 Kilometer Reichweite) also auch mit flüssigem Wasserstoff (für 200 Kilometer) betrieben werden kann.

Der »Hydrogen 7« soll in kleineren Stückzahlen an ausgewählte Kunden in den USA und anderen Ländern vertrieben werden, in denen es Wasserstofftankstellen gibt. Bei ihrer Suche nach neuen Wegen, die Energiedichte zu erhöhen, denken Forscher auch daran, sich die Chemie des Wasserstoffs selbst zu Nutze zu machen. In der reinen Gas- oder Flüssigphase besteht jedes Wasserstoffmolekül aus zwei gebundenen Wasserstoffatomen. Wenn Wasserstoffatome jedoch chemisch an bestimmte andere Elemente gebunden sind, können sie sogar noch dichter gepackt werden als in der Flüssigkeit. Deshalb suchen die Ingenieure nach Materialien, die einen solchen Kunstgriff ermöglichen.

Gas aufsaugen wie ein Schwamm

Zu ihren Favoriten zählen dabei die reversiblen Metallhydride, die 1969 in den Philips-Labors im holländischen Eindhoven entdeckt wurden. Wird eine Samarium-Kobalt-Legierung unter hohem Druck Wasserstoff ausgesetzt, kann sie das Gas in ähnlicher Weise »aufsaugen« wie ein Schwamm das Wasser. Verringert man den Druck, dann wird der Wasserstoff wieder freigesetzt – der Vorgang ist daher umkehrbar.

Nach dieser Entdeckung stürzten sich viele Forscher auf das Phänomen. Zu den ersten in den USA zählten James Reilly vom Brookhaven National Laboratory und Gary Sandrock vom Inco Research and Development Center in Suffern, US-Staat New York. Sie alle untersuchten die Wasserstoffabsorption von Hydridlegierungen. Diese Pionierarbeit brachte die heute üblichen Nickel-Metallhydrid-Akkus hervor. Die Wasserstoffdichte solcher Legierungen kann beträchtliche Werte erreichen – 150 Prozent mehr als in flüssigem Wasserstoff –, da die Wasserstoffatome auf den Raum zwischen den Metallatomen in deren Kristallgittern festgehalten werden (siehe Kasten rechts unten).

Viele Eigenschaften von Metallhydriden lassen sich für die Automobiltechnik nutzen. Dichten oberhalb der von flüssigem Wasserstoff lassen sich damit bei relativ niedrigen Drücken im Bereich zwischen 10 und 100 Bar erreichen. Metallhydride sind zudem in sich stabil; sie benötigen daher zur Speicherung keinerlei zusätzliche Energie. Allerdings ist Wärme erforderlich, um das gespeicherte Gas wieder freizusetzen. Die Achillesferse dieser Materialien ist jedoch ihr Gewicht. Für den Einsatz in praktisch verwendbaren Batterien sind sie viel zu schwer. Metallhydride erreichen bislang ein Speichervermögen von maximal zwei Prozent des Gesamtgewichts. Für eine Reichweite von 500 Kilometern würde ein Wasserstofftank 450 Kilo wiegen – zu viel für Autos mit typischen 1,35 Tonnen.

Daher konzentrieren sich Entwickler heute auf Materialien mit hohem eigenem Wasserstoffgehalt und versuchen, diese auf Fahrzeugzwecke hinzutrimmen: Temperaturen von rund 100 Grad, Drücke zwischen 10 und 100 Bar und ein Freisetzungstempo, das eine zügige Beschleunigung des Fahrzeugs zulässt. In vielen Fällen erweisen sich Materialien, die brauchbare Mengen Wasserstoff speichern können, als etwas zu stabil – weshalb sie hohe Temperaturen benötigen, um den Wasserstoff wieder abzugeben. Aus Magnesium etwa lässt sich Magnesiumhydrid herstellen, das 7,6 Gewichtsprozent an Wasserstoff speichern kann; es benötigt aber für die Freisetzung Reaktionstemperaturen oberhalb von 300 Grad. Wenn in einem praktisch verwendbaren System die Abwärme einer Brennstoffzelle (rund 80 Grad) dazu genutzt werden soll, den Wasserstoff aus dem Metallhydrid freizusetzen, muss die Temperatur dafür niedriger liegen.

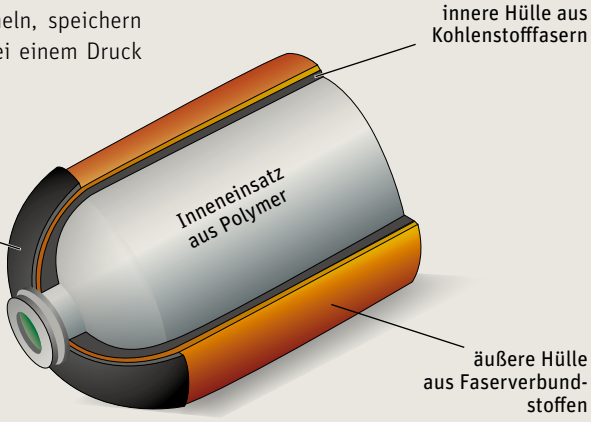
Die Chemiker John J. Vajo und Gregory L. Olson von den HRL Laboratories in Malibu, Kalifornien, und andere arbeiten an einer cleveren Methode, das Temperaturproblem zu lösen. Ihre »destabilisierten Hydride« bestehen aus einer Reihe von Stoffen, die den Reaktionsablauf so verändern, dass das Gas bei niedrigerer Temperatur freigesetzt wird.

Destabilisierte Hydride zählen zu einer Klasse wasserstoffhaltiger Substanzen, die Hydridkomplexe genannt werden. Forscher hatten lange geglaubt, dass viele dieser Verbindungen für die Kraftstoffspeicherung in Autos ungeeignet wären, weil ihre Umwandlung irreversibel ist. Wird der Wasserstoff beim Zerfall der Verbindung freigesetzt, muss diese chemisch behandelt werden, um den Wasserstoff wieder zu binden. Die Chemiker Borislav Bogdanovic und Manfred Schwickardi vom Max-Planck-Institut

Ein Metallhydridspeicher für eine Reichweite von 500 Kilometer würde 450 Kilogramm wiegen

Komprimierter Wasserstoff

Hochdrucktanks, die Druckluftflaschen von Tauchern ähneln, speichern das komprimierte Gas bei einem Druck von 350 bis 700 Bar.



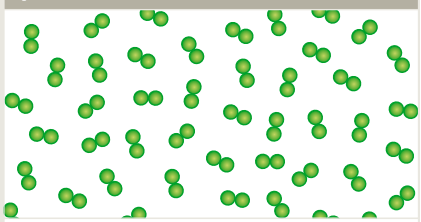
ZYLINDER: QUANTUM TECHNOLOGIES; INFOGRAFIK: MELISSA THOMAS

\+ niedriges Gewicht

− großes Volumen; erfordert Hochdruckkompression und -betankung

S Status: verfügbar

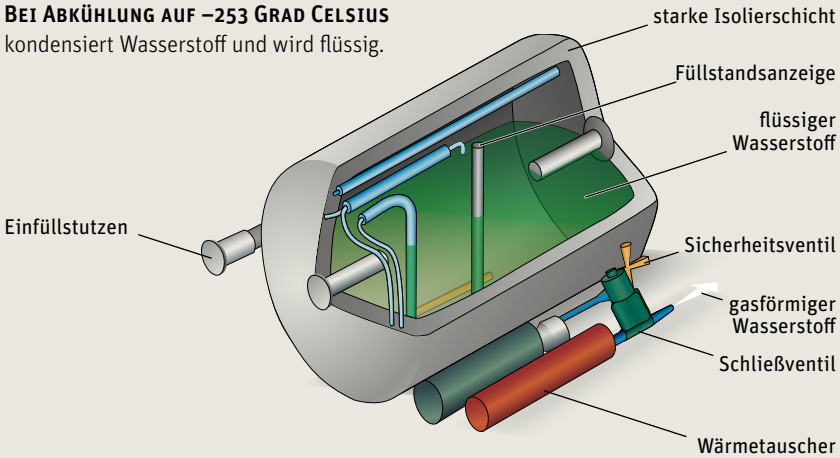
ρ Speicherdichte: niedrig



Wasserstoff

Flüssiger Wasserstoff

Bei Abkühlung auf –253 Grad Celsius kondensiert Wasserstoff und wird flüssig.



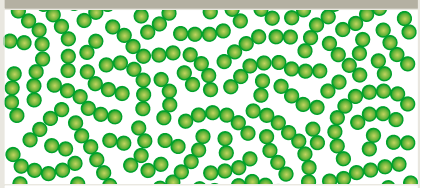
BEHÄLTER: LINDE; INFOGRAFIK: MELISSA THOMAS

\+ niedriges Gewicht und Volumen

− ständige Verdunstungsverluste; Energieverbrauch zur Wasserstoffverflüssigung

S Status: verfügbar

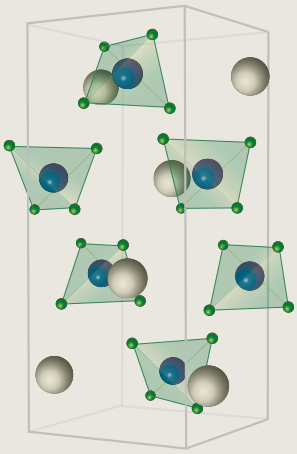
ρ Speicherdichte: hoch



Wasserstoff

Hydridkomplexe

Bindet sich Wasserstoff chemisch an Metalle oder andere Substanzen, entstehen Metallhydride oder Hydridkomplexe. Wärme setzt den gebundenen Wasserstoff bei Bedarf wieder frei.



Wasserstoff
Natrium
Aluminium

Beispiel eines Hydridkomplexes: **Natriumaluminiumhydrid**

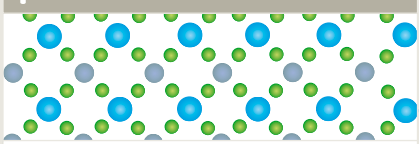
INSTITUTE FOR ENERGY TECHNOLOGY

\+ niedriges Volumen; Betanken im Auto möglich; potenzieller Betrieb bei niedrigen Drücken

− hohes Gewicht; hohe Betriebstemperaturen; zu geringer Kraftstoffdurchfluss

S Status: in Entwicklung

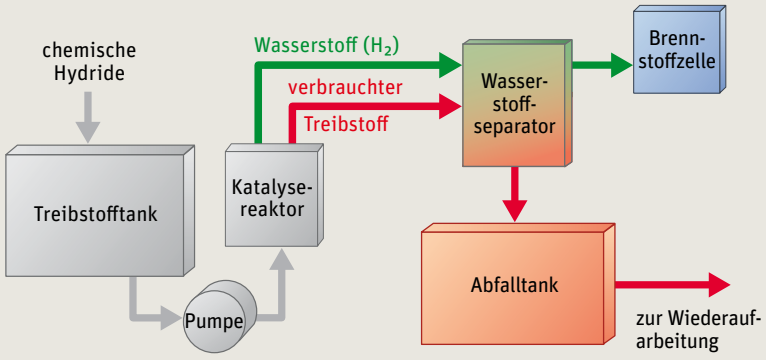
ρ Speicherdichte: hoch



Wasserstoff
Metallatome
Zusatzstoffe

Chemische Hydride

Wasserstoffhaltige Verbindungen, zumeist Flüssigkeiten, setzen bei Erwärmung den Wasserstoff frei.

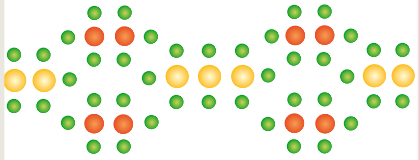


\+ niedriges Gewicht und Volumen, womöglich flüssig

− zur Regeneration müssen Substanzen aus dem Auto/Tank entfernt werden; Recyclingkosten; erfordert entsprechende Infrastruktur

S Status: in der Entwicklung

ρ Speicherdichte: mittel



Wasserstoff
zusätzliche Chemikalien

MELISSA THOMAS

▷ für Kohlenforschung in Mülheim an der Ruhr überraschten die Forschergemeinde jedoch 1996 mit ihrer Entdeckung, dass Natriumaluminiumhydrid-Komplexe (Alanate) Wasserstoff reversibel speichern können, wenn eine kleine Menge Titan zugefügt wird. Ihre Arbeiten lösten im letzten Jahrzehnt intensive Forschung aus. So kann etwa Magnesiumhydrid, das in den HRL-Labors mit Lithiumborhydrid destabilisiert wurde, rund neun Gewichtsprozent an Wasserstoff reversibel speichern und bei 200 Grad Celsius wieder freisetzen. Dieser Fortschritt ist bemerkenswert; doch noch immer ist die Freisetzungstemperatur zu hoch und das Freisetzungstempo für den praktischen Einsatz in der Automobiltechnik zu niedrig. Dennoch ist der Ansatz viel versprechend.

Trotz der Limitierungen sehen Autohersteller in Hybriden mittelfristig noch die beste Option zur Wasserstoffspeicherung bei niedrigen Drücken. Ingenieure bei Toyota und Honda beispielsweise planen in ihrem so genannten Hybridansatz ein System, in dem feste Metallhydride bei moderatem Druck (mit deutlich unter 700 Bar) eingesetzt werden sollen. Nach ihren Prognosen sollen damit Reichweiten von über 500 Kilometern möglich sein.

An Metallhydriden arbeiten bei General Motors und den Sandia National Laboratories Teams zusammen, mit Kollegen in Indien, Australien, Kanada und Russland. Andere Methoden zur Speicherung von Wasserstoff haben Probleme mit der Betankung. Solche chemischen Hydridsubstanzen müssen in der Regel industriell aufgearbeitet werden, um den verbrauchten Wasserstoff zu erneuern. Im Tank selbst kann die Regeneration nicht erfolgen. Wenn der Wasserstoff aus dem Tank komplett freigesetzt ist, muss ein entstandenes Reaktionsnebenprodukt an einer Servicestation entfernt und in einer Chemiefabrik regeneriert werden (siehe Kasten oben).

Vor über 20 Jahren untersuchten japanische Forscher diesen Ansatz, unter anderem in Dekalin-Naphtalin-Systemen. Wenn Dekalin ($C_{10}H_{18}$) erhitzt wird, verwandelt es sich in Naphtalin (einer stechend riechenden Substanz mit der Formel $C_{10}H_8$). Dabei ändert sich die Art der chemischen Bindung, und fünf Wasserstoff-Moleküle werden freigesetzt. Praktisch sieht das so aus, dass Wasserstoff aus einer Dekalinlösung perlt, in der sich das Dekalin in Naphtalin umwandelt. Setzt man Naphtalin unter moderatem Druck Wasserstoff aus, lässt sich der Prozess umkehren: Das Napthalin nimmt den Wasserstoff auf und wandelt sich wieder in Dekalin um (allein das Material beansprucht bereits 6,2 Gewichtsprozent). Die Chemiker Alan Cooper und Guido Pez der Firma Air Products and Chemicals in Allentown (Pennsylvania) arbeiten an einem ähnlichen Verfahren, bei dem organische Lösungen (auf Kohlenhydratbasis) eingesetzt werden. Andere Forscher, darunter S. Thomas Autrey und seine Kollegen vom Pacific Northwest National Laboratory und der Chemieprofessor Larry G. Sneddon von der University of Pennsylvania, untersuchen neuartige flüssige Träger, darunter so genannte Aminoborane, die ebenfalls größere Mengen Wasserstoff speichern und freisetzen können.

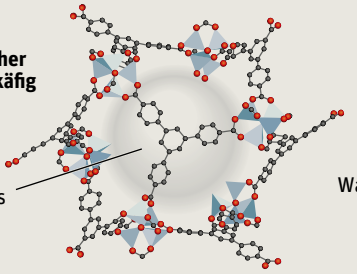
Große innere Oberflächen

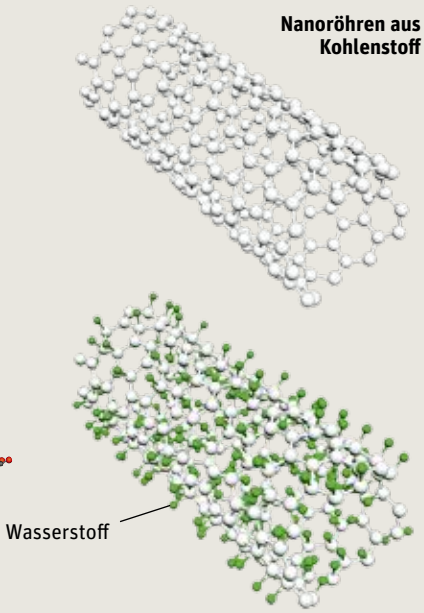
Ein weiterer Ansatz zur Wasserstoffspeicherung basiert auf leichtgewichtigen Materialien mit sehr großen Oberflächen, an denen sich Wasserstoffmoleküle anheften können (oder von der sie adsorbiert werden; siehe Kasten rechts oben).Wie man erwarten kann, nimmt die gespeicherte Wasserstoffmenge mit der inneren Oberfläche in diesen Materialien zu. Nanotechnologen haben zahlreiche neuartige Verbindungen mit sehr großen Oberflächen entwickelt – einige mit bis zu 5000 Quadratmeter pro Gramm (ein Teelöffel dieser Substanz hat umgerechnet eine Oberfläche von 1,2 Hektar). Materialien auf Kohlenstoffbasis sind besonders interessant, da sie wenig wiegen und oft kostengünstig hergestellt werden können. Sie treten in vielerlei unterschiedlichen Nanostruktu-

Wasserstoffadsorption

Wasserstoffatome bleiben an bestimmten »Designer-Materialien« problemlos haften.

Nanoröhren aus Kohlenstoff (oben rechts) können Wasserstoff binden, bis er gebraucht wird (unten rechts). Chemiker entwarfen käfigartige metallorganische Strukturen (MOFs, unten), an die sich Wasserstoff leicht binden kann.



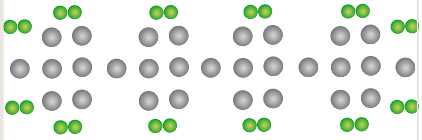


\+ niedriges Gewicht; Betankbarkeit im Auto; womöglich Betrieb bei Zimmertemperatur

– hohes Volumen, muss vermutlich gekühlt werden

S Status: frühes Entwicklungsstadium

ρ Speicherdichte: niedrig



Wasserstoff

Kohlenstoffverbindungen oder andere Nanostrukturen

NANORÖHREN: SSRL, ANTON NIKITIN; METALL-ORGANISCHES GESTELL: UCLA, OMAR M. YAGHI; GRAFIK RECHTS: MELISSA THOMAS

ren auf: als Nanoröhren, Nanohörnchen (hornförmige Röhrchen), Fullerene (ballförmige Moleküle) oder als Aerogele (ultraporöse Festkörper). Auch Aktivkohle, ein preiswertes Material, kann bis zu fünf Gewichtsprozent an Wasserstoff speichern.

Doch all diese Kohlenstoffverbindungen haben eines gemeinsam: Wasserstoff bindet sich nur sehr schwach an ihre Oberflächen. Daher müssen die Materialien mit großer Oberfläche auf Temperaturen auf die von flüssigem Stickstoff abgekühlt werden – also auf –196 Grad Celsius. Im Gegensatz zu Hydridforschern, die mit dem Problem kämpfen, die Wasserstoffbindungen zu lockern, suchen Kohlenstoffforscher nach Möglichkeiten, die Bindungsstärke zu erhöhen, indem sie metallische Dotierstoffe einsetzen oder die Oberflächen der Materialien verändern.

Neben der Forschung an Kohlenstoffverbindungen befassen sich Nanotechnologen mit so genannten metallorganischen Materialien. Vor einigen Jahren entwickelte Omar Yaghi, damals Chemieprofessor an der Universität von Michigan in Ann Arbor und heute an der Universität von Kalifornien in Los Angeles, kleine metallorganische Gerüststrukturen (*metall-organic frameworks*, kurz MOFs). Yaghi und seine Mitarbeiter stellten diese völlig neuartige Stoffklasse von hochporösen kristallinen Materialien her, indem sie anorganische Substanzen über organische »Streben« miteinander verbanden. Sie erhielten so synthetische Verbindungen mit elegant anmutenden Strukturen und physikalischen Eigenschaften, die sich je nach gewünschter Funktion gezielt steuern lassen. Diese heterogenen Strukturen können sehr große Oberflächen haben (bis zu 5500 Quadratmeter pro Gramm), und Forscher können auf ihnen chemische Verbindungen so verändern, dass sie Wasserstoff optimal binden. Bislang konnten Wissenschaftler in ihren Labors MOFs mit einer Wasserstoffspeicherkapazität von sieben Gewichtsprozent bei –196 Grad Celsius erzeugen.

Die bisherigen Fortschritte auf dem Gebiet der Wasserstoffspeicherung sind ermutigend. Dennoch könnte es noch ein Weilchen dauern, bis für mobile Zwecke eine praktikable Lösung gefunden ist. Im Lauf der Jahrhunderte haben sich die grundsätzlichen Vorzüge und Probleme beim Wasserstoffeinsatz in Fahrzeugen eigentlich kaum gewandelt. Ende des 18. Jahrhunderts gelang es Jacques Charles mit Hilfe von Wasserstoff sowie einem leichten Ballon, in einer Gondel zu reisen. Wenn es gelänge, ähnlich geeignete Speicher für den Wasserstofftransport in Autos zu entwickeln, könnten sich die Menschen im 21. Jahrhundert künftig fortbewegen, ohne dem Himmel über ihnen zu schaden. ◁

Sunita Satyapal, John Petrovic und **George Thomas** arbeiten im Programm für angewandte Forschung und Entwicklung der US-Energiebehörde (DOE) über Technologie der Wasserstoffspeicherung. Satyapal leitet die F&E-Aktivitäten zur Wasserstoffspeicherung des DOE. Petrovic ist Berater des DOE and Fellow der American Ceramic Society sowie der American Society for Materials International. Thomas, zurzeit Berater des DOE, arbeitet an den Sandia National Laboratories über die Wechselwirkung von Wasserstoff und Metallen. Die im Text vertretenen Ansichten sind die der Autoren und nicht die der US-Energiebehörde.

Autoren und Literaturhinweise

Hydrogen Pogram: 2006 Annual Merit review proceedings, US-Department of Energy. (www.hydrogen.energy.gov/annual_review06_proceedings.html)

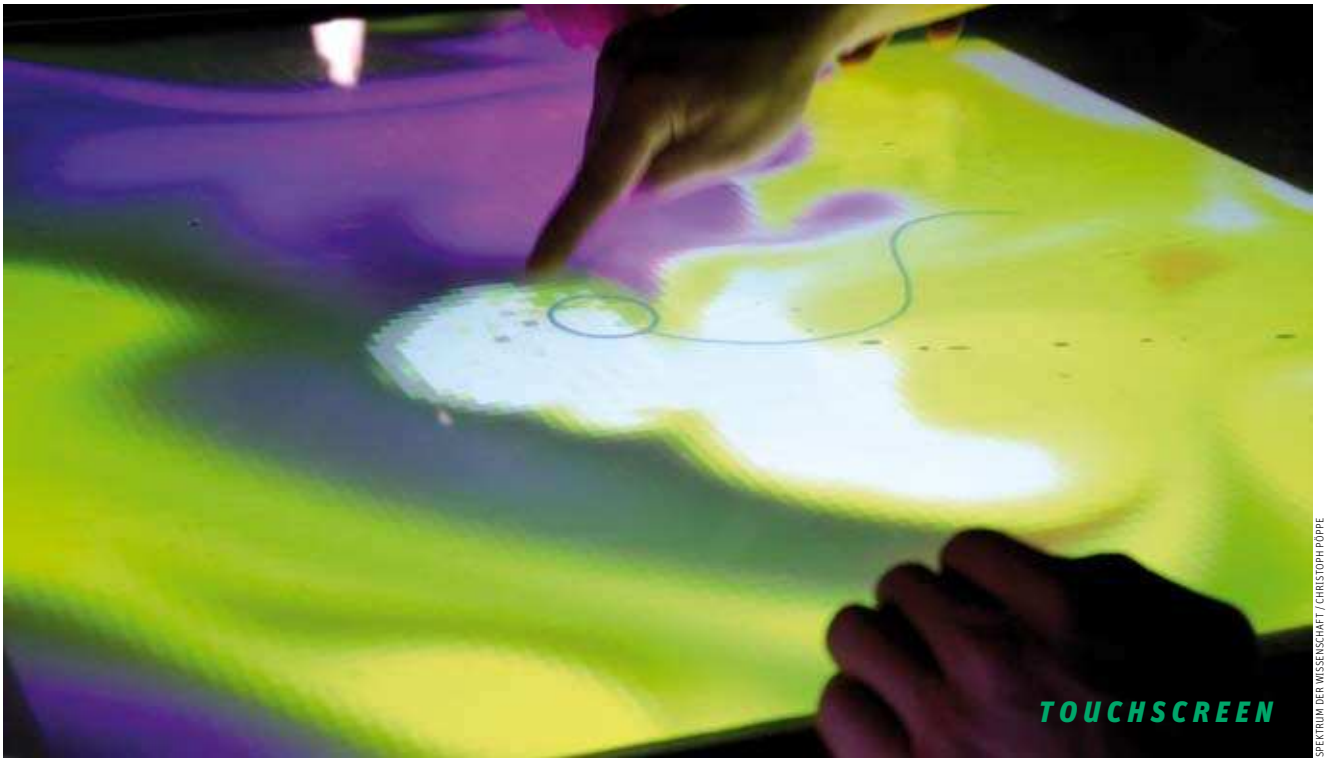
The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs. National Academies Press 2004 (www.nap.edu/catalog.php?record_id=10922)

United Council for Automotive Research: www.uscar.org

International Energy Agency's Hydrogen Implementing Agreement: www.ieahia.org

International Partnership for the Hydrogen Economy: www.iphe.net

Weitere Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/874882.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / CHRISTOPH PÖPPE

Roboter und ein spiritistischer Leuchttisch

Das Finale des Wettbewerbs »Jugend forscht«, in diesem Jahr ausgerichtet von der Kosmetikfirma Beiersdorf in Hamburg, lieferte wieder ein Feuerwerk origineller Ideen. In diesem und dem folgenden Heft wird eine Auswahl der Arbeiten vorgestellt.

Von Christoph Pöppe

Vom Trubel durch einen schwarzen Lichtschutzvorhang abgetrennt, steht ein Tisch, auf dessen Fläche gespenstische Leuchterscheinungen hin- und herwabern. Nur durch ihre Schatten wahrnehmbar sind die Hände zahlreicher Umstehender, die schweigend auf geheimnisvolle Weise das wirre Spiel der Lichter auf dem Tisch beeinflussen (Bild oben).

Was auf den ersten Blick wie das Requisit einer spiritistischen Sitzung aussieht, ist die Fortentwicklung eines Geräts, das Eisenbahnreisende in Gestalt der Fahrkartenautomaten zu fürchten gelernt haben: der berührungsempfindliche Bildschirm (»Touchscreen«).

TOUCHSCREEN

Während die Standardausführung nur als notdürftiger Ersatz für eine gewöhnliche Computermaus dient, hat Pascal Schmitt (19) aus Laufach bei Aschaffenburg einen quadratmetergroßen Schirm konstruiert, der auf die gleichzeitige Berührung durch viele Finger eingeht.

Die spiritistische Tischplatte besteht aus zwei Plexiglasscheiben aus dem Baumarkt mit einem Blatt Transparentpapier dazwischen, das dem darunter angebrachten Beamer als Mattscheibe dient. An der Schmalseite der oberen Platte strahlen Leuchtdioden unsichtbares Infrarotlicht ein. Dieses wird am oberen und unteren Rand der Platte mehrfach totalreflektiert und tritt am anderen Ende wieder aus – es sei denn, ein Finger liegt auf der Platte. Dann wird das Infrarotlicht in den Finger hinein gebrochen und nach unten gestreut, wo eine Infrarotkamera sich das Treiben anschaut. Eine von Pascal Schmitt geschriebene Software kreist die durch die Berührung erzeugten Infrarot-Lichtflecken ein, bestimmt so etwas wie deren Mittel-

punkte und erschließt aus den aktuellen und den jüngst vergangenen Daten auch die Bewegung der Finger auf der Fläche.

Aber was stellt man mit den vielen aufbereiteten Daten an? Auf derlei Input ist die Softwareindustrie bislang nicht vorbereitet. Also musste Pascal Schmitt sich Anwendungen selbst ausdenken und programmieren; und da ist ihm eine ganze Menge eingefallen.

Mehrere klassische Computerspiele werden reizvoller dadurch, dass man an mehreren Stellen zugleich ins Geschehen eingreifen kann. In Grafikprogrammen kann man Objekte auf intuitiv einleuchtende Weise verschieben, drehen und zurechtzupfen, indem man sie an mehreren Stellen anfasst. Simulationen von Strömungs- und Mischprozessen werden ungeheuer anschaulich dadurch, dass man in der simulierten farbigen Brühe beliebig herumrühren und der Strömung Hindernisse in den Weg legen kann. Die eindrucksvolle und umfangreiche Leistung (neben dem Aufbau der Hardware 50 000 Zeilen Programmcode) wurde mit dem 2. Preis im Fachgebiet Arbeitswelt und dem Zukunftstechnologiepreis des Bundesforschungsministeriums gewürdigt.

Merkwürdiges Zusammentreffen: Wenige Tage nach der Preisverleihung kündigt die Firma Microsoft einen Computer namens »Surface« an. Das neue Gerät, für das die ersten Vorarbeiten bereits 2001 begannen, verfügt über einen in eine Tischplatte eingelassenen Bildschirm, der auf Berührung mit mehreren Fingern zugleich eingeht. So kann man auf dem Bildschirm wiedergegebene Bilder durch Berührung mit zwei Fingern drehen und einiges mehr.

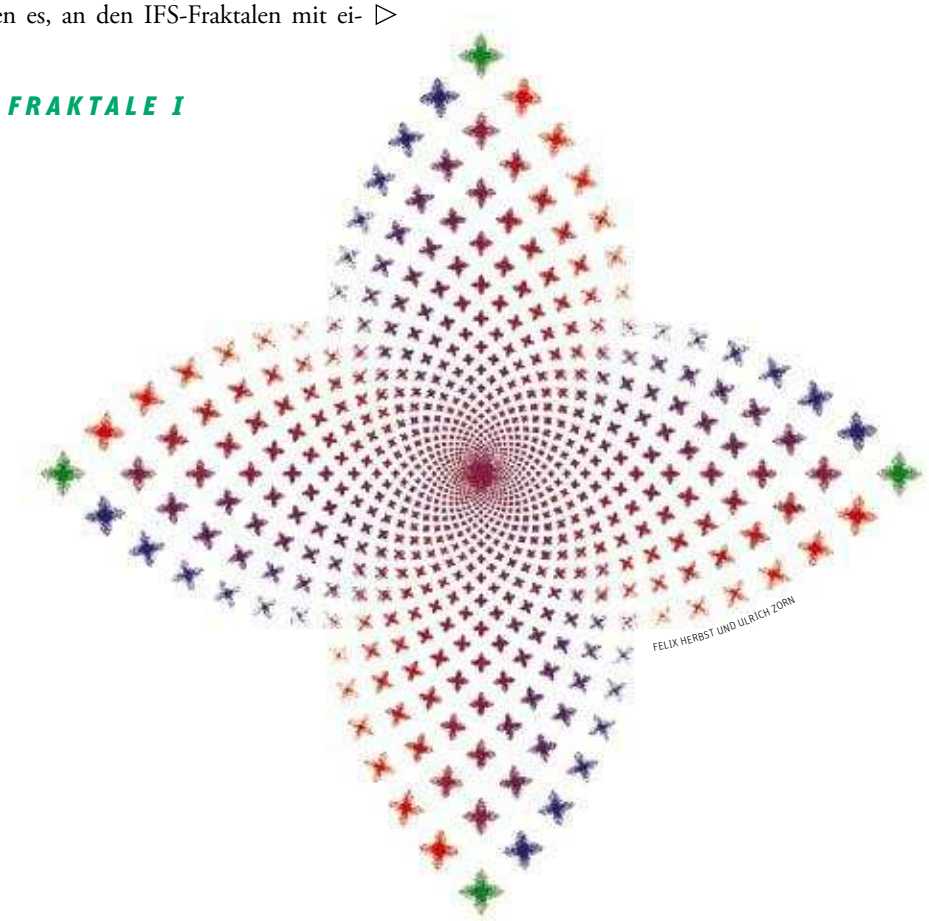
FRAKTALE I

Felix Herbst (16) und Ulrich Zorn (17) von der Goetheschule in Ilmenau (Thüringen) ist es gelungen, auf einer Spielwiese, die als abgegrast galt, noch ergiebige Stellen zu entdecken: fraktale Muster. Man nehme mehrere verschiedene affine Abbildungen (lineare Abbildungen plus Translationen) und wende eine dieser Abbildungen auf einen Startpunkt an, auf das Ergebnis wieder eine, und so weiter, wobei jedes Mal der Zufall darüber bestimmt, welche Abbildung aus dem Sortiment zur Anwendung kommt. Ein solches System iterierter Funktionen (*iterated function system*, IFS) erzeugt selbstähnliche fraktale Bilder; klassisches Beispiel ist der sehr naturnahe Farn von Michael Barnsley (Spektrum der Wissenschaft 9/1989, S. 52).

Eine affine Abbildung wird vollständig beschrieben durch das Viereck, das sie aus einem festgelegten Quadrat macht. Indem man mit der Maus an den Ecken dieser Vierecke zupft, kann man die zugehörige Abbildung in unmittelbar einleuchtender Weise variieren. Das von Felix Herbst und Ulrich Zorn geschriebene Programm und die stark angewachsene Rechenleistung der Computer erlauben es, an den IFS-Fraktalen mit ei- ▷

Felix Herbst und Ulrich Zorn (unten vor einem Sortiment ihrer Werke) entdeckten durch Probieren ein Fraktal, das aussieht, als wäre ein regelmäßiges Quadratgitter von außen nach innen umgestülpt (»am Kreis invertiert«) worden. Aber es entsteht durch sechs affine Abbildungen: vier Verkleinerungen in Richtung auf die Ecken (grüne Teilfiguren) und zwei Drehungen um kleine Winkel nach rechts und links.

FRAKTALE I



FELIX HERBST UND ULRICH ZORN

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / CHRISTOPH PÖPPE

BEIDE: JOHANNES EWALD UND ANDREAS KRAWITZ

FRAKTALE II

Ein Kupferbaum und dessen Simulation mit einem Algorithmus zur diffusionsbegrenzten Aggregation: Beide Strukturen haben fast dieselbe fraktale Dimension.

▷ ner Leichtigkeit herumzuprobieren, von der die Fraktalbegeisterten der frühen 1990er Jahre nur träumen konnten. Dabei ergeben sich auch neue, überraschende Formen (Bild S. 89). Dafür gab es einen 5. Preis in Mathematik.

FRAKTALE II

Mit natürlichen Fraktalen beschäftigten sich Johannes Ewald (19) und Andreas Krawitz (19) aus Landau (Pfalz): Sie untersuchten mikroskopische Metallbäume, wie sie sich aus Salzlösungen abscheiden, nach den Regeln der fraktalen Geometrie und konnten ihr Wachstum durch ein Simulationsprogramm täuschend echt nachbilden (Bild oben). Dies brachte ihnen einen 4. Preis im Fachgebiet Chemie ein.

ZIFFERNFOLGEN

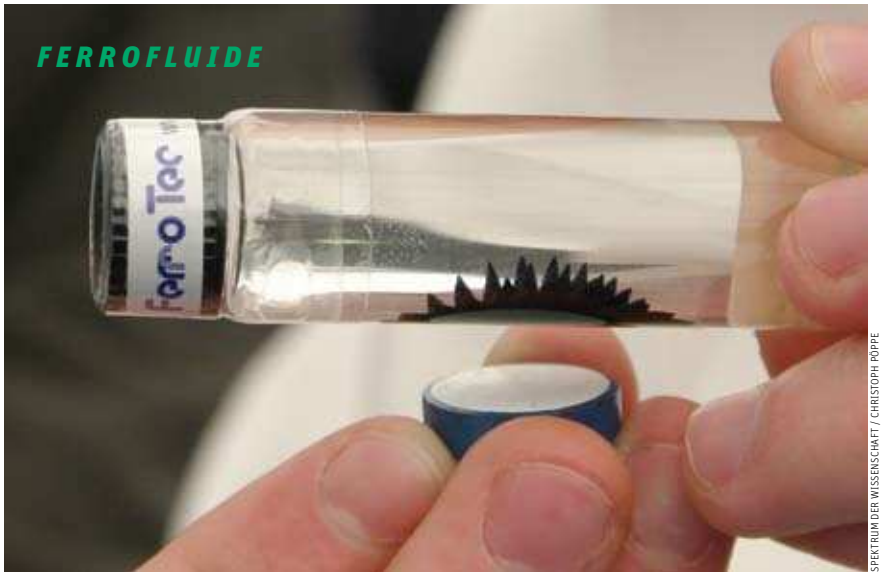
Für einen Menschen ist die Aufgabe, eine völlig zufällige Ziffernfolge auszusprechen, überraschend schwer. Man hat eben keinen Würfel im Gehirn, und einen echten Zufallszahlengenerator schon gar nicht. Was tut man also? Man versucht, in der Ziffernfolge möglichst keine erkennbaren Regelmäßigkeiten aufkommen zu lassen, vermeidet insbesondere Ziffernwiederholungen und lange auf- und absteigende Folgen wie 12478 beziehungsweise 96432. Dabei tut man in der Regel zu viel des Guten: In einer echten Zufallsfolge kommt zweimal dieselbe Ziffer hintereinander deutlich häufiger vor als in einer menschengemachten. Entsprechendes gilt für wachsende oder fallende Teilfolgen.

Nils Asmussen und Marc-Andre Schulz (beide 18) aus Kiel verfolgten eine spezielle Hypothese: Der Mensch hat gewisse Lieblingsmuster im Kopf: häufig gebrauchte Telefonnummern, Postleitzahlen oder Kontonummern, Zahlenfolgen, die für ihn irgendwie gut klingen … Hat er den Beginn eines solchen Musters ausgesprochen, neigt er dazu, das ganze Muster aufzusagen. Irgendwann merkt er, dass er sich dabei zu wiederholen droht, und ändert eine Ziffer ab, fügt eine ein, lässt eine weg oder vertauscht zwei benachbarte Ziffern.

Wie kann man eine solche Hypothese beweisen? Die Jungforscher baten die Unterstufenschüler ihrer Schule zum Test und schrieben mehrere hundert Ziffernfolgen mit einer Durchschnittslänge von etwa 250 mit. Ihre Versuchspersonen mussten die Ziffern aussprechen, statt sie in eine Computertastatur zu hacken; sonst hätten sie Folgen bevorzugt, die gut in der Hand liegen.

Wie findet man Struktur in diesem Datensalat? Man nehme ein bestimmtes Muster und zähle aus, wie intensiv der Mensch es zur Erzeugung seiner Pseudozufallsfolge genutzt haben könnte, wie oft es also – mehr oder weniger abgewandelt – in der ganzen Folge vorkommt; das tue man im Prinzip für jedes denkbare Muster. Auch in einer echten Zufallsfolge sind nicht alle Muster »gleich stark«, das heißt gleich häufig vertreten; aber wenn man sie nach ihrer Stärke aufträgt, ergibt sich eine klassische Gauß'sche Glockenkurve. Die entsprechende Kurve für menschengemachte Folgen hat rechts einen deutlich verdickten Schwanz: Starke Muster spielen also eine messbar erhebliche Rolle.

Das geht so weit, dass man einen Menschen an seinen Lieblingsmustern erkennen kann. In der gegenwärtigen Ausbaustufe erzielt die Software eine Trefferquote von mehr als 95 Prozent. Es ist also durchaus denkbar, dass der Computer der Zukunft seinen Benutzer nicht mehr nach einem Password fragt, sondern ihn bittet, eine Zufallsfolge einzutippen – oder besser anzusagen.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / CHRISTOPH PÖPPE

Ein Ferrofluid stellt im Feld eines starken Permanentmagneten die Stacheln auf. Die Einzelheiten dieses so genannten Rosensweig-Effekts sind bis heute nicht vollständig verstanden.

Interessant wird das Ganze allerdings erst, wenn die zu testenden Muster länger werden und der Rechenaufwand für das erschöpfende Durchprobieren über alle vernünftigen Grenzen steigt: Schon von den Mustern der Länge 6 gibt es eine Million Stück. Mit genetischen Algorithmen brachten die beiden Kieler den Computer dazu, ein Sortiment starker Muster zu finden und sich dabei die meisten Muster nicht einmal anzusehen. Ihre Arbeit wurde mit einem 2. Preis in Mathematik ausgezeichnet.

Die Konzentration des Menschen scheint nach etwa 300 Ziffern so nachzulassen, dass seine persönlichen Eigenheiten deutlicher zu Tage treten. Das allerdings konnte man aus dem vorliegenden Datenmaterial nur erahnen; denn nach durchschnittlich 250 Ziffern hatten die kleinen Versuchspersonen einfach keine Lust mehr.

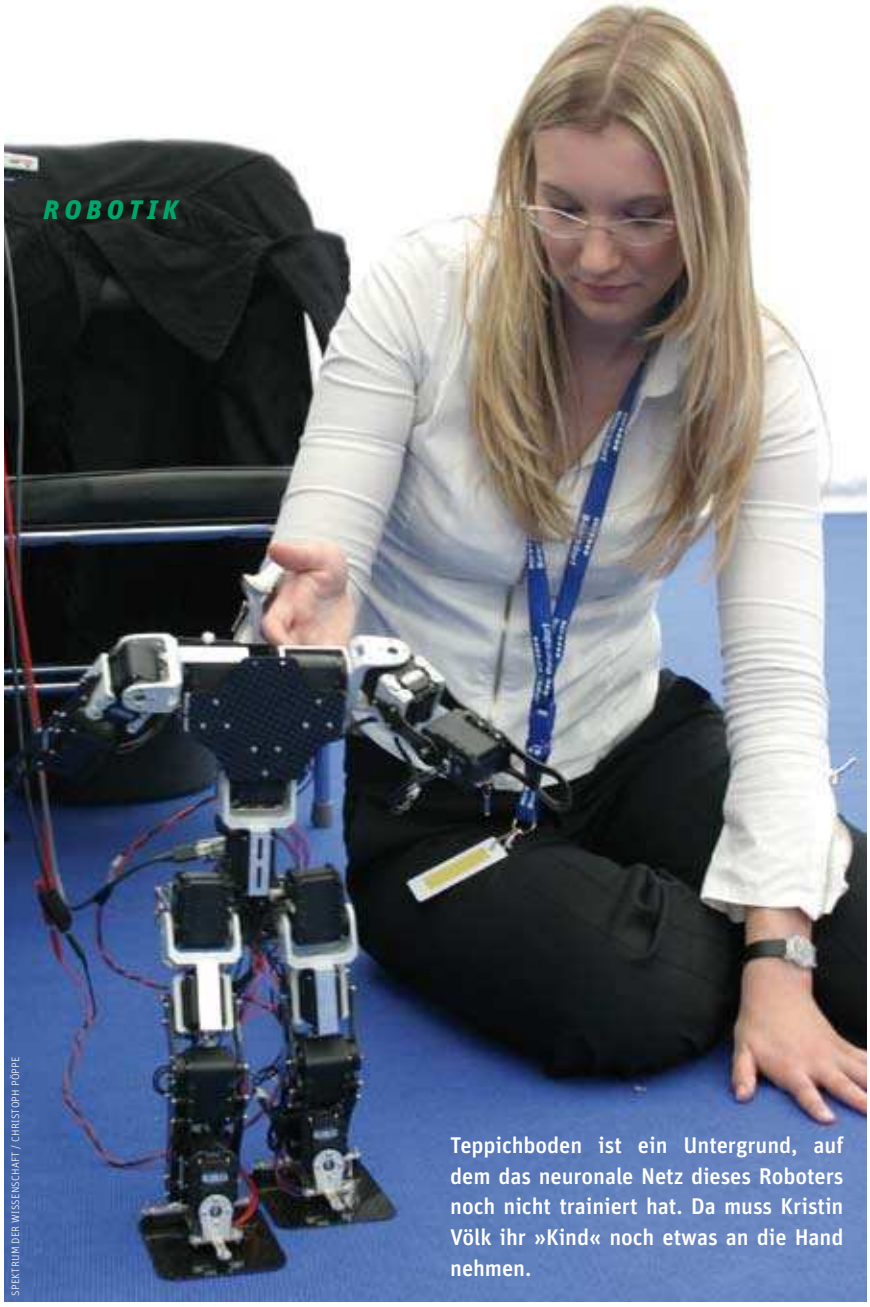
FERROFLUIDE

Offenbar ist die Zeit reif für magnetische Flüssigkeiten (Ferrofluide) – oder zumindest deren Untersuchung mit Schülermitteln. Nanopartikel aus Magnetit, einem stark magnetischen Eisenoxid, werden in einer Trägerflüssigkeit suspendiert, damit sie nicht verklumpen. In einem Magnetfeld nimmt ein Ferrofluid durch ein kompliziertes Wechselspiel zwischen magnetischen und Oberflächenspannungskräften eine spektakuläre Igelform an (Bild links unten). Gleich drei Arbeiten beschäftigten sich in diesem Jahr mit dem Thema: Johannes Wandt (18) aus Altötting bekam den 1. Preis in Chemie für die Analyse der Reaktion mit Ammoniak, die aus Eisensulfat Magnetit erzeugt. Niels Einecke (19), Björn Kruse (18) und Philipp Müller (18) aus Rostock fanden eine Methode, um binnen 90 Minuten mit Schulmitteln Ferrofluide herzustellen. Timo Stein (16) und Fabian Nickel (18) aus Berlin entwickelten ein Verfahren mit ähnlichem Ziel, was der Deutschen Physikalischen Gesellschaft einen Sonderpreis wert war – und beide Gruppen tauschten während der Präsentation eifrig ihre Rezepte aus.

ROBOTIK

Gehen ist etwas vom Schwersten, vor allem wenn man ein Roboter ist. Kristin Völk (20) aus Rödental bei Coburg, seit 2001 regelmäßige »Jugend forscht«-Teilnehmerin und mittlerweile Studentin in Saarbrücken, hat nicht nur einen kleinen Blechmann von gedrungener Körperform zusammengebaut, sondern ihn die richtige Bewegungsform selbst lernen lassen. Nach Probieren und anschließender Bewertung der Gehleistung besserte ein künstliches neuronales Netz die Bewegungen des Roboters immer weiter nach. Je drei Sensoren in seinen beiden großen Plattfüßen messen die Lastverteilung; mit diesem Input steuert der Roboter seine zwanzig Stellmotoren inzwischen so an, dass er in jeder Phase der Bewegung im Gleichgewicht ist. Indem er zum Gewichtsausgleich die Arme hebt und senkt, kann – und muss – er jeden Schritt mit geradezu feierlicher Langsamkeit vollführen (Bild oben), ganz im Gegensatz zum Menschen, bei dem im Normalfall jeder Schritt eine – abgefangene – Fallbewegung ist. Für diese Leistung gab es außer dem 2. Preis im Fach Technik noch zwei Sonderpreise.

Ein entgegengesetztes Ziel verfolgten Eike Rehder (19), Martin Scharf (20) und Andrej Nikonov (20) aus Ahrensburg. Ihr Roboter ist minimal ausgestattet – Grundplatte, zwei Räder und eine passiv über den Tisch gleitende Stütze – und soll Schülern dazu dienen, programmieren zu lernen. Natürlich motiviert es, wenn das kleine Ding nach den ersten Übungen einen Cha-Cha-Cha tanzt. ◁



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / CHRISTOPH PÖPPE

Teppichboden ist ein Untergrund, auf dem das neuronale Netz dieses Roboters noch nicht trainiert hat. Da muss Kristin Völk ihr »Kind« noch etwas an die Hand nehmen.

Christoph Pöppe ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

AUTOR

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/876080.

ASTRONOMIE

Das Leben des Subrahmanyan Chadrasekhar

Die Geschichte des genialen Physikers wird kenntnisreich und lebendig erzählt. Die Entdeckung der Schwarzen Löcher mit in dieses Buch zu packen ist jedoch fast zu viel des Guten.

Der 19-jährige Subrahmanyan Chandrasekhar verließ im August 1930 sein Heimatland Indien, um im britischen Cambridge sein Physikstudium fortzusetzen. Auf der knapp dreiwöchigen Seereise berechnete er das Verhalten von Materie, wie man sie im Inneren eines Weißen Zwergsterns erwarten kann. Dort ist die Dichte des Gases so hoch, dass die Elektronen das Pauli'sche Ausschließungsprinzip spüren. Die Folge ist ein entartetes Gas, bei dem die Temperatur nicht mehr vom Druck abhängt. Im Gegensatz zu den vorherigen Arbeiten zu dem Thema berücksichtigte Chandrasekhar die Spezielle Relativitätstheorie. Zu seiner Überraschung besagten seine Gleichungen, dass es eine Massenobergrenze geben musste, oberhalb deren ein Weißer Zwerg nicht mehr stabil sein konnte, sondern in sich zusammenstürzen müsste. Diese Grenze lag sogar erstaunlich niedrig, bei etwa einer Sonnenmasse.

Dieses Ergebnis schockierte die Astronomen, allen voran Sir Arthur Eddington, den einflussreichsten englischen Astronomen dieser Zeit. Er argumentierte, dass das Ergebnis falsch sein müsse: Offensichtlich gibt es Sterne, die deutlich schwerer als die Sonne sind. Diese können nach Chandrasekhars Ergebnis nicht als Weiße Zwerge enden. Aber als was sonst? Nach dem Stand von 1930 waren Weiße Zwerge das einzig bekannte Endstadium der Sternentwicklung.

Am 11. Januar 1935 kam es zu einem verhängnisvollen Zusammenstoß des jungen, genialen Inders mit dem etablierten Eddington. In einer Sitzung der Royal Astronomical Society fasste Chandrasekhar seine Ergebnisse aus den vergangenen fünf Jahren zusammen. Nach dem Vortrag erhob sich Eddington und machte seinen jüngeren Kollegen unter Hohn und Spott nieder. Dieses traumatische Erlebnis blieb Chandrasekhar im Gedächtnis und belastete das Verhältnis der beiden von da an.

Arthur Miller, Physiker und Wissenschaftshistoriker am University College in London, beginnt sein Buch mit dieser Szene, die er fast wie ein Duell in einem Western beschreibt. Sympathieträger ist dabei das verkannte indische Genie, ein passender Einstieg für Millers These: Chandrasekhar war genial, seine Umwelt nicht vorbereitet auf ihn, und deswegen musste er unverhältnismäßig lang – nämlich bis 1983 – auf den Nobelpreis warten.

Natürlich liest sich ein tragischer Chandrasekhar spannender als ein erfolgsverwöhnter. Aber Mitleid ist eigentlich nicht angebracht. Schließlich hat Chandrasekhar letztendlich Recht behalten. Bereits 1970 entdeckte der Röntgensatellit Uhuru die Strahlungsquelle Cygnus-X1 im Sternbild Schwan und damit das erste Indiz für ein stellares Schwarzes Loch. Das also war das Endstadium eines massiven Sterns. Damit war der »Krieg der Astronomen« 26 Jahre nach Eddingtons Tod endgültig entschieden.

Chandrasekhar hatte somit Anteil daran, dass die Schwarzen Löcher »das Licht der Welt erblickten«. Allerdings ist der Untertitel des Buchs irreführend. Miller hat vor allem eine Biografie Chandrasekhars geschrieben. Der Frage, wie die Wissenschaftler zu der Überzeugung gelangten, dass es Schwarze Löcher gibt, wird deutlich weniger Platz zugestanden. Die Geschichte ist gut recherchiert, und dem Autor gelingt es, die vielschichtigen Beziehungen Chandrasekhars zu seinen Kollegen lebendig werden zu lassen. Insbesondere das Verhältnis zu Eddington ist nicht so einseitig geschildert, wie es die erste Szene vermuten lassen könnte.

Darüber hinaus versucht Miller, die Geschichte um die Schwarzen Löcher mit in den Text einzuflechten. Das wird Chandrasekhar nicht ganz gerecht: Zum einen hat er nicht ausschließlich an Schwarzen Löchern gearbeitet, und zum anderen war die von ihm erkannte obere Massengrenze für Weiße Zwerge nur einer von vielen Puzzlesteinen in dem großen Rätsel. Die Erkenntnis, dass es Schwarze Löcher wirklich gibt, ist die Arbeit eines ganzen Netzwerks von Wissenschaftlern. Insgesamt kommen dadurch 237 Personen in Millers Buch vor – eine harte Probe für den Leser, der im Durchschnitt drei neue Namen pro Doppelseite kennen lernen muss.

»Der Krieg der Astronomen« ist also eher etwas für Leser, die schon eine gewisse Vorbildung in Astronomiegeschichte haben. Wer weiß, wer Meghnad Saha, Fritz Zwicky, Gerard Kuiper und Fred Hoyle waren, wird Millers Buch mit Freude lesen, denn es zeichnet ein lebendiges Bild des Menschen und Wissenschaftlers Chandrasekhar.

Stefan Gillessen

Der Rezensent ist Postdoc am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching.

Subrahmanyan Chandrasekhar (1910 – 1995) als Fellow am Trinity College in Cambridge 1934 und am Raman-Institut in Bangalore 1982

Arthur I. Miller

Der Krieg der Astronomen
Wie die Schwarzen Löcher das Licht der Welt erblickten

Aus dem Englischen von Hainer Kober.
Deutsche Verlags-Anstalt, München 2006.
475 Seiten, € 24,90

Unterwegs mit Craniacs

Peter Matthiessen nimmt uns mit auf eine unterhaltsame Weltreise zu den Kranichen.

Sie werden geschossen und verspeist, unabsichtlich oder gewollt vergiftet, ihrer Heimat beraubt und auf ihrem Zug durch unzählige künstliche Hindernisse wie Stromleitungen lebensgefährlich bedroht: Den Kranichen dieser Erde geht es nicht gut. 13 der 15 Arten gelten als vom Aussterben bedroht. Es war also höchste Zeit für den amerikanischen Ornithologen und Bestsellerautor Peter Matthiessen, die letzten Vertreter dieser Vogelfamilie zu besuchen und uns vorzustellen.

Dabei müsste es den Kranichen eigentlich gut gehen. Immerhin werden sie von vielen Völkern als Boten des Himmels oder des Glücks verehrt, und ihre Balztänze fanden Eingang in die religiösen Riten und Mythen dieser Menschen. So galten sie im alten, taoistisch geprägten China als Symbol für ein langes Leben, Weisheit und Alter; Verstorbene gelangten auf ihrem Rücken ins Jenseits. In Japan stehen die großen Vögel ebenfalls für das Glück der Langlebigkeit, und wer die Geduld aufbringt, tausend Origami-Kraniche zu falten, dem erfüllen die Götter einen Wunsch. Nordamerikanische Indianer erhoben die heimischen Kraniche in den Rang von Schutzgeistern (»Totems«), heilig waren sie auch afrikanischen Stämmen, und den Europäern kündeten sie von der erfreulich nahen Ankunft des Frühlings.

Vorbei schienen diese Zeiten spätestens nach dem Zweiten Weltkrieg. Den kommunistischen Diktaturen der Sowjetunion, Chinas, der Mongolei und Nordkoreas galten sie entweder als lästiges, nicht weiter zu beachtendes Hindernis für die wirtschaftliche Erschließung der Steppen, Feuchtgebiete, Flüsse und Wälder oder als dekadenter Zierrat verdammenswerter Religionen. Mitten im Zentrum der höchsten Kranichvielfalt – die Hälfte aller Arten lebt in Ostasien – brachen die Bestände ein; Mandschuren-, Schwarzhals- und Nonnenkranich drohten plötzlich auszusterben.

Auch der Zusammenbruch des Kommunismus in der Sowjetunion und der Mongolei sowie die wirtschaftliche Öffnung Chinas brachten keine Wende zum Besseren. Im Gegenteil: Die Ausbeutung der Natur im Fernen Osten beschleunigte sich noch einmal; Wälder wurden zersägt und klein gehäckselt, Flüsse gestaut oder mit Chemieabfällen verpestet, Sümpfe entwässert, die Kraniche als Ernteschädlinge oder für den Kochtopf geschossen und als Haustiere eingefangen.

Zur gleichen Zeit zeigte sich aber ein erster Hoffnungsschimmer. Das weit gehende Ende der Ost-West-Konfrontation ermöglichte es russischen, chinesischen, japanischen, koreanischen, amerikanischen und europäischen Kranichschützern erstmals, länderübergreifend Erfahrungen auszutauschen und sogar konkrete Schutzvorhaben wie Reservate für die Tiere anzustoßen.

Mit vielen dieser »Craniacs« – Kranichverrückten, wie der Autor sie nennt und sich mit einbezieht – sprach Matthiessen und reiste mit ihnen zu den fernsten Regionen der Erde: dorthin, wo die letzten der grazilen Vögel noch Zuflucht finden. Herausgekommen ist dabei ein vergnüglicher, spannender und interessanter Reisebericht, der bis auf Südamerika – den einzigen Kontinent ohne Kraniche – einmal um die ganze Welt führt.

Neben allerlei Wissenswertem aus den Bereichen Taxonomie – diese Absätze sind die einzigen Längen im Buch –, Evolution, Naturgeschichte, Gefährdung und Schutz erfährt der Leser vieles zu den bereisten Ländern und ihrer Kultur wie Natur. Ein besonderes Augenmerk gilt den Naturvölkern der verschiedenen Regionen, die meist ebenso gefährdet sind wie die von ihnen verehrten Kraniche.

Beschreibungen der Natur und vor allem der restlichen Vogelwelt kommen nicht zu kurz; man merkt Matthiessen an, dass er nicht nur Autor ornithologischer Fachbücher, sondern auch passionierter Vogelbeobachter ist. All das wird immer wieder garniert von mitunter tragikomischen Anekdoten wie den Begegnungen der Naturschützer mit nervösen koreanischen Grenzwächtern, mongolischen Kochgebräuchen oder englischen Landadligen.

Leider hat es sechs Jahre gedauert, bis das Buch endlich – aber sehr gut – ins Deutsche übersetzt wurde. Mittlerweile ist einiges passiert: Dem sibirischen Nonnenkranich geht es noch schlechter, dem europäischen Grau- dagegen deutlich und dem amerikanischen Schreikranich – einst einer der seltensten Vögel der Welt – immerhin etwas besser. Insgesamt ist die Lage dieser Tierfamilie nach wie vor prekär.

Es bleibt deshalb noch vieles zu tun, bis die Kraniche überall nicht nur ihre alte Wertschätzung wieder erfahren, sondern auch noch effektiv und für alle Zeit geschützt werden. Matthiessens lesenswertes Plädoyer für die Boten des Himmels kommt deshalb jederzeit richtig.

Daniel Lingenhöhl

Der Rezensent ist promovierter Geograf, passionierter Hobbyornithologe und freier Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

Peter Matthiessen
Die Könige der Lüfte
Reisen mit Kranichen

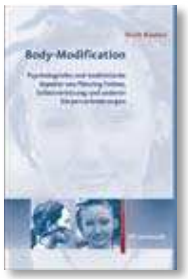
Aus dem Englischen von Birgit Brandau und Hartmut Schickert. Hanser, München 2007. 368 Seiten, € 24,90

Links: Jungfernkranich *(Anthropoides virgo)*; rechts: Südlicher Kronenkranich *(Balearica regulorum)*; rechts oben: Brolgakranich *(Grus rubicundus)*

SOZIOLOGIE

Der eigene Körper als Kunstwerk

Was sich manche Menschen antun (lassen), geht über eine Tätowierung oder den schlichten Nasenring weit hinaus.



Wenn man es wörtlich nimmt, betreibt jeder, der sich rasiert, die Fingernägel schneidet, sich zum Zwecke der Bräunung in die Sonne legt oder sich schlank hungert, bereits *body modification*, Veränderung des eigenen Körpers. Weiter geht es vom Konventionellen – gefärbte Haare, die übliche, abwaschbare Gesichtsbemalung, Ohrringe – über das mittlerweile Übliche – das Durchbohren und Behängen anderer geeigneter Hautstellen sowie die Tätowierung – bis hin zu gezielt gesetzten Brandnarben und der Entfernung von Körperteilen, auf deren Unversehrtheit der Durchschnittsmensch den größten Wert legt.

Erich Kasten, Dozent für medizinische Psychologie an der Universität Magdeburg, wird in seinem Buch nicht müde zu betonen, dass all diese Formen von Körperveränderung nahtlos ineinander übergehen, und gibt sich alle Mühe, dieses Kontinuum unter einem einheitlichen Blickwinkel zu betrachten. Ich gestehe, es will mir nicht gelingen, ihm darin zu folgen. Ich sehe zu wenig Gemeinsamkeiten zwischen einem Haarschnitt und der Amputation eines gesunden Beins, selbst wenn diejenigen, die derlei Veränderungen an sich vornehmen ließen, das in beiden Fällen mit dem Ziel ihrer Selbstverwirklichung begründen.

Lassen wir die Schauergeschichten beiseite, die Kasten der Vollständigkeit halber auch aufführt: Ein Mann hackt sich den eigenen Arm ab, weil der ihm auf einer Wanderung in menschenleerer Bergwelt hoffnungslos von einem herabstürzenden Felsbrocken eingeklemmt wurde; mehrere Menschen nehmen in einem akuten Wahnanfall eine Bibelstelle wörtlich und reißen sich die Augen aus; die grausame, immer noch massenhaft praktizierte Genitalverstümmelung findet in aller Regel gegen den Willen der betroffenen Mädchen statt. Im Zentrum des Buchs steht die Frage, aus welchen Motiven körperlich und geistig gesunde Menschen Schmerzen, körperliche Einschränkungen und möglicherweise die Ablehnung ihrer Umwelt um einer Veränderung ihres Körpers willen freiwillig in Kauf nehmen.

Schlusskorrektur aus Prüderie? Die ausladende Tätowierung über dem Steißbein heißt in diesem Buch »Hirschgeweih«.

Die erste Antwort, die aus vielen vom Autor zitierten Studien hervorgeht, ist ziemlich trivial: Man lässt sich ein Piercing oder Tattoo machen, weil die anderen es auch haben. Es bedarf seit jeher keiner besonderen Begründung, wenn man einer Mode folgt. Schwieriger wird es bei den härteren Eingriffen. Die Idee, sich die Zunge spalten, den Penis von unten aufschlitzen oder sich an mehreren durch die Haut getriebenen Fleischerhaken aufhängen zu lassen, kursiert in der Regel nicht auf dem Schulhof – wohl aber im Internet.

Selbstverstümmelung

Entsprechend hatte auch Erich Kasten kaum Gelegenheit, diese Leute zu befragen, sondern war auf deren Selbstdarstellungen auf einschlägigen Websites angewiesen – womit er unvermeidlich einem ihrer wesentlichen Motive Vorschub leistet, nämlich beim »Normalo« diese halb voyeuristische, halb angeekelte Neugier zu erregen. Wie unerotisch muss das rasseln, wenn die im Buch abgebildeten, dicht an dicht mit Ringen behängten Genitalien tatsächlich zur Anwendung kommen sollten. Auch mit ausgiebigen Zitaten bleibt das Bild zwangsläufig unvollständig. Wie viele »BodMods« es wirklich gibt, bleibt im Dunkeln. Von ihren inneren Konflikten erfährt man nur das, was sie selbst preisgeben und was der Betreiber der Website passieren lässt.

Am meisten zu denken gegeben hat mir die Geschichte einer Frau, die sich als 16-Jährige ein Bein amputieren ließ, »letztendlich mit dem Einverständnis sowohl ihrer Eltern als auch ihres Psychiaters, nachdem sie mehr als zwei Jahre dort in Behandlung gewesen war«. Bei der ausführlichen Diskussion aller denkbaren Motive findet sich wenig mehr als eine diffuse Neugier; bestimmend ist der schiere Wunsch, »eine dominante, alles verzehrende Besessenheit«. »Am Ende wurde die Amputation nicht deswegen durchgeführt, weil sie es wollte, sondern weil es die einzige Möglichkeit war, sie davon abzubringen, es weiterhin zu wollen.« Nach ihrer eigenen Darstellung ist sie seither glücklicher und würde sich wieder genauso entscheiden, wenn sie noch einmal die Wahl hätte.

Unterstellen wir, dass sie die direkten und indirekten Folgekosten ihrer Entscheidung selbst trägt. Dann wäre das Ganze doch eine Angelegenheit ihres Selbstbestimmungsrechts. Es ist nicht ihr Problem, wenn der Rest der Welt ihre Motive nicht nachvollziehen kann. Warum will mir die paternalistische Überzeugung, man müsse solche Menschen vor sich selbst schützen, nicht aus dem Kopf? Warum weigern sich Mediziner, die gegen eine operative Geschlechtsumwandlung nichts einzuwenden haben, vehement, einen solchen wesentlich weniger radikalen Eingriff auszuführen?

Erich Kasten weiß zu berichten, dass der Chirurg, der sich, »um Schlimmeres zu verhüten«, zu medizinisch nicht indizierten Amputationen bereit gefunden hatte, nach deren Bekanntwerden einem großen Medienrummel und zahlreichen weiteren Anfragen ausgesetzt war – die dann nicht erfüllt wurden, weil das Krankenhaus nicht wieder in die Schlagzeilen geraten wollte.

Ein Blick auf die Extremform der *body modification* mag der Klarheit aufhelfen. Bekanntlich lösen spektakuläre Suizide Wellen von Nachahmungstaten aus. So wie es aussieht, hätten sich auch einige Menschen nicht umgebracht, wenn sie die dafür ausreichende Portion Zyankali damals nicht so bequem übers Internet hätten beziehen können. Selbst bei der Entscheidung für Leben oder Tod gibt es also einen erheblichen Einfluss der Mode – was unweigerlich die Frage aufwirft, was in solchen Fällen von der Freiheit der Willensentscheidung zu halten ist. Eine gute Antwort auf diese schwierige Frage weiß das Buch nicht zu geben; das wäre allerdings auch zu viel verlangt.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Erich Kasten

Body-Modification

Psychologische und medizinische Aspekte von Piercing, Tattoo, Selbstverletzung und anderen Körperveränderungen

Reinhardt, München 2006. 393 Seiten, € 29,90

LINGUISTIK

Ist Sprache wie ein Pfauenschwanz?

Wer sich gewählt ausdrücken kann und trotzdem überlebt, muss über gute Gene verfügen, sagt der Autor. Aber ob derlei Sprachkünste unsere Urahninnen beeindruckten?

Gerade in neuester Zeit wird über die große Frage nach der Entstehung der menschlichen Sprache in der Forschung wieder lebhaft diskutiert, und zwar unter Beteiligung der verschiedensten Fächer. Denn über zwei Dinge besteht mittlerweile Einigkeit: Eine Fachdisziplin allein kann nicht darauf hoffen, auf diese große Frage eine plausible Antwort zu geben, und Erklärungsversuche jeder Art müssen vor der (Evolutions-)Biologie bestehen können.

In diese Diskussion klinkt sich das vorliegende Buch ein. Wolfgang Steinig, Professor für Didaktik der deutschen Sprache an der Universität Siegen, richtet sich ausdrücklich an ein Laienpublikum. Er bemüht Fachausdrücke nur in bescheidenem Ausmaß, beschränkt sich stark bei den Literaturangaben und verzichtet gänzlich auf Fußnoten. Sein Plauderton gleitet nicht selten ins Triviale ab. Muss man uns wirklich sagen, dass ein schöner Mensch nicht zwangsläufig auch mathematisch begabt ist (S. 76)? Auch hat Steinig einen Hang zu spektakulären, aber völlig abseitigen Thesen wie etwa der vom »bicameral mind«, die Julian Jaynes 1976 in Umlauf setzte und die, kurz gesagt, Ilias und Odyssee als Kronzeugen bemüht für einen fundamentalen Wandel in der menschlichen Hirnarchitektur, der dann innerhalb einer einzigen Generation stattgefunden haben müsste – abenteuerlicher geht es kaum.

Das Hauptproblem an diesem Buch ist aber ein ganz anderes. Steinig erhebt den Anspruch, gänzlich neue Ansätze vorzutragen, will aber den Leser nicht mit der dazu notwendigen Argumentation behelligen.

Zweifellos kann man an Sprache scheitern, etwa indem man erfolglos um Formulierungen ringt oder angefangene Sätze nicht regelgerecht zu Ende bringt. Aus dieser Beobachtung entwickelt Steinig eine »Handicap-Theorie« der Sprache, nach biologischem Vorbild: Dem Pfauenmännchen verschaffen seine langen Schwanzfedern keinen Überlebensvorteil, sind sogar bei der Futtersuche oder der Flucht vor Fressfeinden eher hinderlich, finden aber gerade deshalb bei den Pfauenweibchen besonderen Anklang, weil sie ein Indiz dafür liefern, dass ihr Träger gegenüber seinen weniger üppig ausstaffierten Geschlechtsgenossen über ganz besondere Vorzüge verfügt, wenn er sich trotz dieses Handicaps noch auf Erden tummelt. Entsprechend ist nach Steinig die Sprache die Arena, auf der man sich gegenüber den Geschlechtsgenossen zwecks Steigerung der eigenen sexuellen Attraktivität zu profilieren sucht.

Leider bleibt an dieser zunächst ganz spannenden Idee allzu viel diffus. Nach welchen Kriterien ist das Scheitern an der Sprache zu bemessen? Das subjektive Empfinden des einzelnen Sprechers oder Zuhörers scheint ein wenig zuverlässiger Indikator, und im Fall der missglückten Syntax hat man den Verdacht, dass hier streckenweise einfach der schriftsprachliche Standard die Messlatte abgegeben hat. Nicht besser als mit dem »Scheitern« sieht es mit dem »Handicap« aus. Unter dieser Flagge segeln unter anderem: Schwierigkeiten, die eine bestimmte Sprache dem Lernenden anderer Muttersprache aufgibt, etwa das Kasussystem des Litauischen; Schwierigkeiten, das eigene Sprechen der Norm anzupassen; Schwierigkeiten, die unsere Fähigkeit zur Lautsprache für das physische Überleben mit sich bringt, etwa die Gefahr, sich tödlich zu verschlucken; Schwierigkeiten, einem anderen den Weg so zu beschreiben, dass er das Ziel tatsächlich findet. Letztlich gerät alles, was in irgendeiner Hinsicht schiefgehen kann, Steinig zu einem »Handicap«.

Selbst wenn man hinter all dem wirklich die sexuelle Selektion am Werke sehen will, bleibt die Frage, wie es dazu kommt, dass man mit Sprache etwas aussagen kann. Um Weibchen mit Lautäußerungen zu beeindrucken, hätten es hinlänglich aufwändige Balzgesänge doch auch getan? Apropos Weibchen: Wie hat man es zu verstehen, dass Pfauenweibchen zwar kein Rad schlagen, Menschenweibchen aber sehr wohl ▷

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

PREISRÄTSELLÖSUNG

Lösung zu »Uhrenvergleich« (Mai 2007)

Genau 66 zweideutige Zeigerstellungen gibt es auf einer Uhr, deren Stunden- und Minutenzeiger exakt gleich aussehen. Zwischen Mitternacht und 12 Uhr mittags gibt es also 132 Zeitpunkte, zu denen die Uhrzeit nicht eindeutig bestimmbar ist. Der kleinste Ablesefehler (gerundet auf volle Sekunden) beträgt 55 Minuten und 23 Sekunden, der größte 10 Stunden, 9 Minuten und 14 Sekunden.

Zur Zeit $h_1{:}m_1$ hat der Stundenzeiger der Uhr gegen die 12-Uhr-Position den Winkel $\alpha_1 = (h_1 + m_1/60) \cdot 30°$, der Minutenzeiger den Winkel $\beta_1 = m_1 \cdot 6°$. Dieselbe Anzeige mit vertauschten Rollen ($\alpha_1 = \beta_2$ und $\alpha_2 = \beta_1$) entspricht der Uhrzeit $h_2{:}m_2$ mit den Winkeln $\alpha_2 = (h_2 + m_2/60) \cdot 30°$ und $\beta_2 = m_2 \cdot 6°$. Das liefert die Bedingungen $60 \cdot (12h_2 - h_1) = 143m_1$ und $60 \cdot (12h_1 - h_2) = 143m_2$.

Für alle ganzzahligen Werte h_1 und h_2 zwischen 0 und 11 liefern diese beiden Gleichungen Werte für m_1 und m_2. Für $h_1 = h_2$ stehen die beiden Zeiger genau übereinander, und die Zeigerstellung ist gar nicht zweideutig. Somit verbleiben noch $132 = 12 \cdot 11$ Möglichkeiten für die Wahl von h_1 und h_2. Dabei entsprechen jeweils (h_1, h_2) und (h_2, h_1) derselben Zeigerstellung unter Vertauschung von Stunden- und Minutenzeiger; also gibt es 66 zweideutige Zeigerstellungen.

Für den Ablesefehler erhalten wir $(h_1 + m_1/60) - (h_2 + m_2/60) = (h_1 - h_2) \cdot 12/13$. Dieser liegt zwischen zirka 55,385 Minuten, wenn sich h_1 und h_2 nur um 1 unterscheiden, und 10 Stunden und rund 9,23 Minuten für $|h_1 - h_2| = 11$. Da aber die Uhr die Zeit nur bis auf Vielfache von zwölf Stunden angibt, kann man etwa einen Fehler von zehn Stunden auch als einen von zwei Stunden verstehen. Wählt man stets den kleineren der beiden denkbaren Fehler, so tritt der maximale Ablesefehler für $|h_1 - h_2| = 6$ auf und beträgt 5 Stunden, 32 Minuten und 18 Sekunden.

Die Gewinner der drei Elefantenrucksäcke sind Gernot Singer, Wien; Michael Baldus, Möhnesee; und Roland Maier, Riemerling.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unsere Online-Wissenschaftszeitung spektrumdirekt (www.spektrumdirekt.de) bietet Ihnen unter dem Stichwort »Knobelei« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

▷ sprechen können? In der vorliegenden Form hinterlässt Steinigs Handicap-Theorie nur den vagen Eindruck, es könnte vielleicht irgendetwas dran sein, aber was genau, davon könne man sich kein rechtes Bild machen. Insbesondere bleiben viele an sich einleuchtende Überlegungen für die eigentliche Argumentation wertlos.

Ähnlich verhält es sich auch mit der zweiten, dem Buch den Titel gebenden These, wonach die Sprache in rituellen Tänzen entstanden sei. Steinig steht hier mit beiden Beinen fest auf dem Boden der von Noam Chomsky geprägten Linguistik – ein Boden, dessen Belastbarkeit vielen aus ernst zu nehmenden Gründen als begrenzt erscheint. Davon erfährt man aber bei Steinig nichts. Deshalb läuft seine Aufforderung an den Leser, die »Stringenz seiner Geschichte« zu überprüfen, ins Leere: Stringent ist schließlich auch die Schöpfungsgeschichte. Andere, plausiblere Geschichten aber werden dem Leser vorenthalten. Vermutlich nicht einmal aus bösem Willen: Steinig verschenkt auch einiges, was für seine Position spricht.

Man liest – durchaus mit Vergnügen – allerlei Wissenswertes und Überzeugendes, aber auch Schwammiges und Unfundiertes. Gesichertes Wissen und einleuchtende Überlegungen gehen unmerklich in gewagte Spekulationen über – und Steinig ist nicht der Mann, der von sich aus Warnlaternen aufstellt. »Ständig formulierte Einschränkungen und Zweifel würden dazu führen, dass Sie sich nicht auf meine Überlegungen, Ideen, Hypothesen einließen, sondern gleich Ihre kritische Notbremse zögen.«

Was soll man mit einem Verkäufer anfangen, der einem das Kleingedruckte nicht aushändigen will mit der Begründung, wenn man es gelesen habe, werde man am Ende womöglich von einem Kauf absehen? Vermutlich wird man ihm höflich für seine respektablen Bemühungen danken und sich ansonsten anderweitig informieren. Das ist auch in diesem Fall zu empfehlen.

Vera Binder

Die Rezensentin hat Vergleichende Sprachwissenschaft und Klassische Philologie in Tübingen studiert und ist Studienrätin im Hochschuldienst am Institut für Altertumswissenschaften der Universität Gießen.

Wolfgang Steinig
Als die Wörter tanzen lernten
Ursprung und Gegenwart von Sprache

Elsevier Spektrum Akademischer Verlag, München 2007. 456 Seiten, € 24,–

Preisausschreiben

Spektrum der Wissenschaft lädt Sie ein, an einem wirtschaftswissenschaftlichen Experiment teilzunehmen.

Wie in zwei vorangegangenen Experimenten dieser Art (»Zahlenwahlspiel«, 11/1997, S. 23; 2/1998, S. 16 sowie »Kooperationsspiel«, 11/2002, S. 16; 5/2003, S. 14) geht es darum, in einer Begegnung mit unbekannten Partnern ein möglichst gutes Ergebnis zu erzielen. Dabei kommt es nicht nur darauf an, was Sie tun, sondern auch, was Ihr Partner tut. Der wiederum muss sich überlegen, was Sie tun . . .

Das vorliegende Experiment stammt von den Wirtschaftswissenschaftlern Miguel Costa-Gomes von der Universität York (Großbritannien), Vincent Crawford von der Universität von Kalifornien in San Diego und Rosemarie Nagel von der Universitat Pompeu Fabra in Barcelona. In einer späteren Ausgabe werden diese Autoren über die Ergebnisse berichten.

EIN ROMANTISCHER ABEND ZU ZWEIT

Alex und Bianca kennen sich erst seit wenigen Tagen; aber schon den ersten Blicken, die sich die beiden zuwarfen, ist unschwer zu entnehmen, dass aus der flüchtigen Bekanntschaft mehr werden könnte. Überraschend schnell findet sich ein Termin für ein gemeinsames Abendessen – und an dieser Stelle geraten die beiden ins Grübeln.

Beiden ist es ein dringendes Bedürfnis, dass dieser Abend in jeder Hinsicht ein Erfolg wird. Und natürlich möchte man die Harmonie nicht dadurch gefährden, dass man zur Unzeit über Geld redet. Leider leben beide in einer Gesellschaft, in der es keine festen Regeln dafür gibt, wie die Kosten des Vergnügens aufzuteilen sind. Vielleicht ist Alex ein sehr traditionell gesinnter Mann, der darauf besteht, dass der Herr zahlt und die Dame seinen Wünschen bereitwillig folgt; Bianca dagegen möchte genau in diesem Punkt keine Missverständnisse aufkommen lassen und favorisiert eine hälftige Aufteilung. Oder sie möchte zwar ihre Eigenständigkeit wahren, schätzt es aber zugleich, sich verwöhnen zu lassen, und kommt für sich selbst zu dem Schluss, es sei am besten, wenn man die Kosten im Verhältnis 3 : 4 teilt, sie also zu einer Rechnung von 350 Dinaren 150 Dinare beiträgt und er 200. Oder er hat nichts dagegen, sich zumindest teilweise aushalten zu lassen, und ist am glücklichsten mit einem Verhältnis von 2/3: Er zahlt 200 Dinare, sie 300 von einer Gesamtrechnung von 500.

AMIR KALIJKOVIC / FOTOLIA.DE

Beiden ist es extrem wichtig, dass das Verhältnis v ihrer Beiträge, in den letzten beiden Beispielen $v = 3/4$ für sie und $v = 2/3$ für ihn, möglichst genau eingehalten wird. Sagen wir, es bestimmt die Machtverhältnisse in der Beziehung, die aus einem gelungenen Abend erwachsen könnte. Dagegen kommt es auf den Betrag selbst nicht an. Er muss nur in einem gewissen Rahmen liegen: Mehr als eine obere Grenze erlaubt der Geldbeutel nicht, und weniger als einen Mindestbetrag wollen weder Alex noch Bianca ausgeben: Nur ein Cheeseburger mit Cola light wäre doch zu unromantisch.

Alex kennt Biancas *v*-Wert, das heißt das Verhältnis von ihren zu seinen Ausgaben, bei dem sie sich am wohlsten fühlt, ebenso wie die obere und die untere Grenze ihrer Ausgabebereitschaft. Er weiß also beispielsweise, dass sie mindestens 200 und höchstens 600 Dinare zu dem Abend beitragen will. Und natürlich kennt er die entsprechenden Werte für sich selbst, die zum Beispiel zwischen 400 und 600 liegen. Ebenso ist Bianca über seine Einstellungen (v-Wert und Grenzen der Ausgabebereitschaft) informiert, und über ihre eigenen sowieso.

Beide scheuen die offene Diskussion darüber, wie die Kosten des Abends aufzuteilen sind, und einigen sich daher auf ein etwas romantischeres Verfahren: Jeder legt unabhängig vom anderen einen Betrag seiner Wahl in ein Kästchen. Danach öffnen sie das Kästchen und wählen das Lokal des Abends entsprechend dem Betrag, den sie darin vorfinden.

WIE WÜRDEN SIE IN DIESER SITUATION ENTSCHEIDEN?

Wohlgemerkt, es geht nicht darum, dass möglichst viel Geld im Kästchen ist. Vielmehr bewerten beide – jeder für sich – den Abend danach, wie gut ihre Erwartungen erfüllt worden sind. Nehmen wir an, Bianca hat einen v-Wert von 0,4, legt 100 Dinare ins Kästchen und stellt fest, dass Alex 250 Dinare hineingetan hat. Dann ist das für sie bereits ein perfekter Abend, denn $250 \cdot 0{,}4 = 100$.

Aber das wird nur ausnahmsweise vorkommen. Im Allgemeinen wird sich zwischen Biancas Erwartung und der Realität eine Lücke d auftun, die wie folgt zu berechnen ist:

$d = |\text{eigener Beitrag} - (\text{eigener } v\text{-Wert}) \cdot (\text{Beitrag des Partners})|$

Wenn im obigen Beispiel Alex 350 statt 250 Dinare ins Kästchen getan hat, ist für sie $d = |100 - 0{,}4 \cdot 350| = |-40| = 40$; die senkrechten Striche (»Betragsstriche«) zeigen an, dass es nicht darauf ankommt, ob das Ergebnis positiv oder negativ ist. Während Bianca den Abend mit $d = 40$ noch als einigermaßen gelungen bewertet, ist Alex tief enttäuscht. Sein v-Wert ist nämlich 0,6, sodass sein d den Wert $d = |350 - 0{,}6 \cdot 100| = 290$ hat.

Beide rechnen die Abweichung d vom Idealzustand nach folgender Formel in eine Punktzahl p um, die genau ihre Einschätzung des Abends widerspiegelt:

$$p = \max(0, 200 - d) + \max(0, 100 - d/10)$$

Im Idealfall ($d = 0$) ergeben sich 300 Punkte. Für jede Einheit, um die man das Ideal verfehlt, verliert man zunächst 1,1 Punkte (einen Punkt aus dem ersten Summanden der Formel und 0,1 Punkte aus dem zweiten). Größere Abweichungen ($d > 200$) kosten darüber hinaus nur noch 0,1 Punkte pro Einheit. Selbst wenn man fürchten muss, weit vom Idealzustand entfernt zu bleiben, lohnt es immer noch, ihm zuzustreben. Die Mühe bringt Punkte, solange d unter 1000 bleibt; erst ab dann wird auch der zweite Term gleich null.

Ein Beispiel: Alex ist bereit, zwischen 200 und 600 Dinare auszugeben, und hat einen v-Wert von 1,4; Biancas Grenzen sind 400 und 800 Dinare, und ihr v-Wert ist 0,8. Wenn er 300 Dinare beiträgt und sie 500, bleibt für ihn eine Lücke von $d = |300 - 1{,}4 \cdot 500| = 400$, was $p = 60$ Punkte bedeutet. Für sie ergibt sich die Lücke $d = |500 - 0{,}8 \cdot 300| = 260$; das macht 74 Punkte. Wenn Bianca 400 Dinare (ihr Minimum) beiträgt, ist es für Alex optimal, 560 beizutragen, was innerhalb seiner Grenzen liegt. Wenn Alex 300 Dinare beiträgt, würde Bianca am liebsten 240 geben; aber das liegt unterhalb ihrer Grenzen. Daher ist 400 das Beste, was sie aus ihrer Sicht tun kann.

Ein weiteres Beispiel: Alex hat die Grenzen 300 und 800 und einen v-Wert von 0,6; die Werte für Bianca sind 200, 600 und 0,8.

Szenario Nr.	Ihre Einstellungen			die Einstellungen Ihres Partners			Ihr Beitrag
	untere Grenze	obere Grenze	v-Wert	untere Grenze	obere Grenze	v-Wert	
1	100	900	1,5	300	500	0,7	
2	300	900	1,5	300	500	0,4	
3	100	500	1,1	300	900	1,2	
4	300	500	1,4	300	900	0,8	
5	100	900	1,1	100	500	1,3	
6	100	500	0,7	100	900	0,5	
7	100	500	1,3	100	900	1,1	
8	300	500	0,7	100	900	1,5	
9	300	500	0,4	300	900	1,5	
10	300	500	0,7	100	900	0,5	
11	100	500	1,5	100	900	0,5	
12	300	900	1,2	100	500	1,1	
13	300	900	0,8	300	500	1,4	
14	100	900	0,5	300	500	0,7	
15	100	900	0,5	100	500	0,7	
16	100	900	0,5	100	500	1,5	

FRANZ PFLUEGL / FOTOLIA.DE

Er gibt 800, sie 500; dann hat er ein $d = |800 - 0{,}6 \cdot 500| = 500$ und bekommt 50 Punkte, sie bekommt mit $d = |500 - 0{,}8 \cdot 800| = 140$ dagegen 146 Punkte. Wenn er mit 800 an seine obere Grenze geht, wäre ihre optimale Wahl 640 ($= 0{,}8 \cdot 800$), was aber oberhalb ihres Budgets liegt, sodass sie mit der Wahl 600 ihren Vorstellungen am nächsten kommt. Wenn sie dagegen 500 wählt, erreicht Alex mit seiner unteren Grenze 300 aus seiner Sicht einen perfekten Abend.

DAS PREISAUSSCHREIBEN

Versetzen Sie sich in sechzehn verschiedene Szenarien. Ihre Einstellungen und die Ihres Partners sind für jedes Szenario in der nebenstehenden Tabelle angegeben. Sie sind gewissermaßen in jedem Szenario ein anderer Mensch und treffen einen anderen Partner. Geben Sie für jeden Einzelfall an, wie viel Geld Sie beitragen würden (in Dinaren, mit höchstens zwei Stellen hinter dem Komma). Ihr Beitrag wird von Szenario zu Szenario unterschiedlich ausfallen, muss aber zwischen den jeweils gültigen Grenzen liegen (beide Grenzen eingeschlossen). Wohlgemerkt: Sie können über den Beitrag Ihres Partners Vermutungen anstellen, ihn aber nicht bestimmen.

Senden Sie uns Ihre Wahl über die Website www.spektrum.de/preisausschreiben oder per Post an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, 69038 Heidelberg. Geben Sie bitte Ihren Namen und Ihre Adresse an und, wenn Sie wollen, auch Alter, Geschlecht und Beruf. Wir wären Ihnen auch dankbar, wenn Sie eine Begründung für Ihre Entscheidungen mitschicken würden. Einsendeschluss ist der 31. Juli 2007.

Unter allen Teilnehmern mit vollständigen Einsendungen losen wir sechs Gewinner aus. Wenn Sie zu den Gewinnern zählen, verbringen Sie – nur in unserer Fantasiewelt! – einen Abend mit jedem der anderen Gewinner in einem der sechzehn Szenarien, die wir ebenfalls per Zufall auswählen. Die Punkte, die ein Gewinner nach den oben angegebenen Formeln an den fünf Abenden erreicht, werden zusammengezählt und an ihn ausgezahlt. Ein Punkt ist einen halben Euro wert.

LINGUISTIK

Ist Sprache wie ein Pfauenschwanz?

Wer sich gewählt ausdrücken kann und trotzdem überlebt, muss über gute Gene verfügen, sagt der Autor. Aber ob derlei Sprachkünste unsere Urahninnen beeindruckten?

Gerade in neuester Zeit wird über die große Frage nach der Entstehung der menschlichen Sprache in der Forschung wieder lebhaft diskutiert, und zwar unter Beteiligung der verschiedensten Fächer. Denn über zwei Dinge besteht mittlerweile Einigkeit: Eine Fachdisziplin allein kann nicht darauf hoffen, auf diese große Frage eine plausible Antwort zu geben, und Erklärungsversuche jeder Art müssen vor der (Evolutions-)Biologie bestehen können.

In diese Diskussion klinkt sich das vorliegende Buch ein. Wolfgang Steinig, Professor für Didaktik der deutschen Sprache an der Universität Siegen, richtet sich ausdrücklich an ein Laienpublikum. Er bemüht Fachausdrücke nur in bescheidenem Ausmaß, beschränkt sich stark bei den Literaturangaben und verzichtet gänzlich auf Fußnoten. Sein Plauderton gleitet nicht selten ins Triviale ab. Muss man uns wirklich sagen, dass ein schöner Mensch nicht zwangsläufig auch mathematisch begabt ist (S. 76)? Auch hat Steinig einen Hang zu spektakulären, aber völlig abseitigen Thesen wie etwa der vom »bicameral mind«, die Julian Jaynes 1976 in Umlauf setzte und die, kurz gesagt, Ilias und Odyssee als Kronzeugen bemüht für einen fundamentalen Wandel in der menschlichen Hirnarchitektur, der dann innerhalb einer einzigen Generation stattgefunden haben müsste – abenteuerlicher geht es kaum.

Das Hauptproblem an diesem Buch ist aber ein ganz anderes. Steinig erhebt den Anspruch, gänzlich neue Ansätze vorzutragen, will aber den Leser nicht mit der dazu notwendigen Argumentation behelligen.

Zweifellos kann man an Sprache scheitern, etwa indem man erfolglos um Formulierungen ringt oder angefangene Sätze nicht regelgerecht zu Ende bringt. Aus dieser Beobachtung entwickelt Steinig eine »Handicap-Theorie« der Sprache, nach biologischem Vorbild: Dem Pfauenmännchen verschaffen seine langen Schwanzfedern keinen Überlebensvorteil, sind sogar bei der Futtersuche oder der Flucht vor Fressfeinden eher hinderlich, finden aber gerade deshalb bei den Pfauenweibchen besonderen Anklang, weil sie ein Indiz dafür liefern, dass ihr Träger gegenüber seinen weniger üppig ausstaffierten Geschlechtsgenossen über ganz besondere Vorzüge verfügt, wenn er sich trotz dieses Handicaps noch auf Erden tummelt. Entsprechend ist nach Steinig die Sprache die Arena, auf der man sich gegenüber den Geschlechtsgenossen zwecks Steigerung der eigenen sexuellen Attraktivität zu profilieren sucht.

Leider bleibt an dieser zunächst ganz spannenden Idee allzu viel diffus. Nach welchen Kriterien ist das Scheitern an der Sprache zu bemessen? Das subjektive Empfinden des einzelnen Sprechers oder Zuhörers scheint ein wenig zuverlässiger Indikator, und im Fall der missglückten Syntax hat man den Verdacht, dass hier streckenweise einfach der schriftsprachliche Standard die Messlatte abgegeben hat. Nicht besser als mit dem »Scheitern« sieht es mit dem »Handicap« aus. Unter dieser Flagge segeln unter anderem: Schwierigkeiten, die eine bestimmte Sprache dem Lernenden anderer Muttersprache aufgibt, etwa das Kasussystem des Litauischen; Schwierigkeiten, das eigene Sprechen der Norm anzupassen; Schwierigkeiten, die unsere Fähigkeit zur Lautsprache für das physische Überleben mit sich bringt, etwa die Gefahr, sich tödlich zu verschlucken; Schwierigkeiten, einem anderen den Weg so zu beschreiben, dass er das Ziel tatsächlich findet. Letztlich gerät alles, was in irgendeiner Hinsicht schiefgehen kann, Steinig zu einem »Handicap«.

Selbst wenn man hinter all dem wirklich die sexuelle Selektion am Werke sehen will, bleibt die Frage, wie es dazu kommt, dass man mit Sprache etwas aussagen kann. Um Weibchen mit Lautäußerungen zu beeindrucken, hätten es hinlänglich aufwändige Balzgesänge doch auch getan? Apropos Weibchen: Wie hat man es zu verstehen, dass Pfauenweibchen zwar kein Rad schlagen, Menschenweibchen aber sehr wohl ▷

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

PREISRÄTSELLÖSUNG

Lösung zu »Uhrenvergleich« (Mai 2007)

Genau 66 zweideutige Zeigerstellungen gibt es auf einer Uhr, deren Stunden- und Minutenzeiger exakt gleich aussehen. Zwischen Mitternacht und 12 Uhr mittags gibt es also 132 Zeitpunkte, zu denen die Uhrzeit nicht eindeutig bestimmbar ist. Der kleinste Ablesefehler (gerundet auf volle Sekunden) beträgt 55 Minuten und 23 Sekunden, der größte 10 Stunden, 9 Minuten und 14 Sekunden.

Zur Zeit $h_1{:}m_1$ hat der Stundenzeiger der Uhr gegen die 12-Uhr-Position den Winkel $\alpha_1 = (h_1 + m_1/60) \cdot 30°$, der Minutenzeiger den Winkel $\beta_1 = m_1 \cdot 6°$. Dieselbe Anzeige mit vertauschten Rollen ($\alpha_1 = \beta_2$ und $\alpha_2 = \beta_1$) entspricht der Uhrzeit $h_2{:}m_2$ mit den Winkeln $\alpha_2 = (h_2 + m_2/60) \cdot 30°$ und $\beta_2 = m_2 \cdot 6°$. Das liefert die Bedingungen $60 \cdot (12h_2 - h_1) = 143m_1$ und $60 \cdot (12h_1 - h_2) = 143m_2$.

Für alle ganzzahligen Werte h_1 und h_2 zwischen 0 und 11 liefern diese beiden Gleichungen Werte für m_1 und m_2. Für $h_1 = h_2$ stehen die beiden Zeiger genau übereinander, und die Zeigerstellung ist gar nicht zweideutig. Somit verbleiben noch $132 = 12 \cdot 11$ Möglichkeiten für die Wahl von h_1 und h_2. Dabei entsprechen jeweils (h_1, h_2) und (h_2, h_1) derselben Zeigerstellung unter Vertauschung von Stunden- und Minutenzeiger; also gibt es 66 zweideutige Zeigerstellungen.

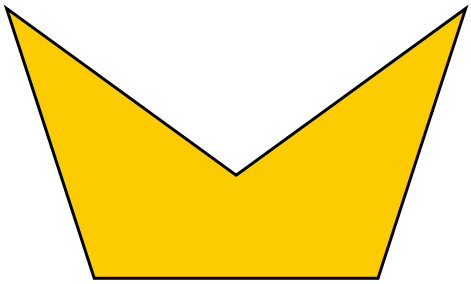
Für den Ablesefehler erhalten wir $(h_1 + m_1/60) - (h_2 + m_2/60) = (h_1 - h_2) \cdot 12/13$. Dieser liegt zwischen zirka 55,385 Minuten, wenn sich h_1 und h_2 nur um 1 unterscheiden, und 10 Stunden und rund 9,23 Minuten für $|h_1 - h_2| = 11$. Da aber die Uhr die Zeit nur bis auf Vielfache von zwölf Stunden angibt, kann man etwa einen Fehler von zehn Stunden auch als einen von zwei Stunden verstehen. Wählt man stets den kleineren der beiden denkbaren Fehler, so tritt der maximale Ablesefehler für $|h_1 - h_2| = 6$ auf und beträgt 5 Stunden, 32 Minuten und 18 Sekunden.

Die Gewinner der drei Elefantenrucksäcke sind Gernot Singer, Wien; Michael Baldus, Möhnesee; und Roland Maier, Riemerling.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unsere Online-Wissenschaftszeitung spektrumdirekt (www.spektrumdirekt.de) bietet Ihnen unter dem Stichwort »Knobelei« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

PARKETTIERUNGEN

Mukundis Krone



Eine unscheinbare Figur entpuppt sich als überraschend wandlungsfähig: Sie pflastert die Ebene periodisch, nichtperiodisch – und in wilden Mischungen aus beiden Arten zugleich.

Von Christoph Pöppe

Stellen Sie sich vor, Sie hätten ein Badezimmer zu fliesen, und zwar mit lauter Exemplaren einer ganz speziellen Kachel (Bild oben). Wie würden Sie das anstellen?

Ein echter Fliesenleger würde diese Form nicht besonders schätzen. Eine einspringende Ecke macht die Aufgabe, eine große Fläche lückenlos zu bedecken, in der Regel nicht einfacher. Umso überraschender ist es, dass es mit dieser speziellen Kachel nicht nur eine, sondern unendlich viele Möglichkeiten gibt, die Ebene zu pflastern. (Als Mathematiker lassen wir uns von den engen Grenzen unseres Badezimmers nicht beirren und nehmen von Anfang an die unendlich ausgedehnte Ebene in den Blick.)

Fünfzählige Symmetrie

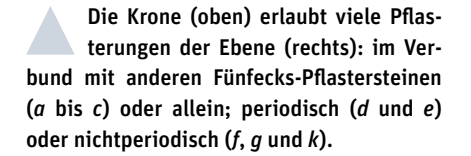
Mukundi Hartmann, ein Mensch, der schon viele Spiele ersonnen und viele Berufe ausgeübt hat, ist beim ausgiebigen Spielen mit geometrischen Formen auf diese Figur gekommen, die er »Krone« genannt hat. Sie entsteht aus einem regelmäßigen Fünfeck, indem man eine seiner Ecken mitsamt den ihr anliegenden Seiten nach einwärts umschnappen lässt oder, was auf dasselbe hinausläuft, von dem Fünfeck eine Raute mit dem Öffnungswinkel 72 Grad wegnimmt. Mit etwas Fantasie kann man tatsächlich eine kleine Krone darin sehen.

Mit dem Fünfeck kommt auch dessen fünfzählige Drehsymmetrie ins Spiel – und an dieser Stelle pflegen die mathematischen Fliesenleger aufzuhorchen. Denn was ihre handwerkenden Kollegen bevorzugen, die Periodizität – dasselbe Teilmuster wiederholt sich parallelverschoben immer wieder bis ins Unendliche –, ist mit der fünfzähligen Symmetrie nicht vereinbar. Wenn also das Muster einen bestimmten Mittelpunkt haben soll mit der Eigenschaft, dass es nach einer Fünfteldrehung um diesen Mittelpunkt wieder genauso aussieht wie zuvor, muss man sich etwas Besonderes ausdenken.

Das haben im Lauf der Zeit verschiedene Leute versucht, angefangen bei Johannes Kepler (1571–1630), der die Weltenharmonie nicht nur in der Bewegung der Planeten, sondern auch in möglichst harmonischen Anordnungen regelmäßiger Fünfecke in der Ebene suchte. Bei allen derartigen Versuchen bleiben Lücken zwischen den Fünfecken, die man zu neuen Pflastersteinen ernennen muss. Dabei drängen sich auf: der Fünfstern (das »Pentagramm«), die oben erwähnte dicke Raute, ihre dünnere Schwester mit einem Öffnungswinkel von 36 Grad, das Zehneck und einige weitere Figuren (Bild rechts, *a*).

Mit einem so großen Sortiment an Steinen wächst allerdings die Anzahl der möglichen Pflasterungen ins Unübersichtliche. Es war daher ein großer Fortschritt, als der britische Mathematiker Roger Penrose eine Methode fand, nichtperiodische Pflasterungen mit nur zwei Steinen zu erzeugen: den beiden genannten Rauten oder, alternativ, zwei nur geringfügig komplizierteren Figuren namens Drachen und Pfeil (Spektrum der Wissenschaft 11/1998, S. 112). Obendrein gab Penrose ein Verfahren an, mit dem man aus den Steinen des einen Parketts, den dicken und dünnen Rauten, solche des anderen Parketts, also Drachen und Pfeile, machen kann und umgekehrt.

Beide Umwandlungen, nacheinander angewandt, zerlegen wenige dicke und dünne Rauten in viele kleinere dicke und dünne Rauten. Die kann man durch Vergrößern auf die Größe der ursprünglichen Rauten bringen, so aus einem begrenzten Parkett ein größeres machen, und das beliebig oft. Das entscheidende Mittel zur Erzeugung nichtperiodischer Parkette ist eine solche Substitutionsregel:



Die Krone (oben) erlaubt viele Pflasterungen der Ebene (rechts): im Verbund mit anderen Fünfecks-Pflastersteinen (*a* bis *c*) oder allein; periodisch (*d* und *e*) oder nichtperiodisch (*f*, *g* und *k*).

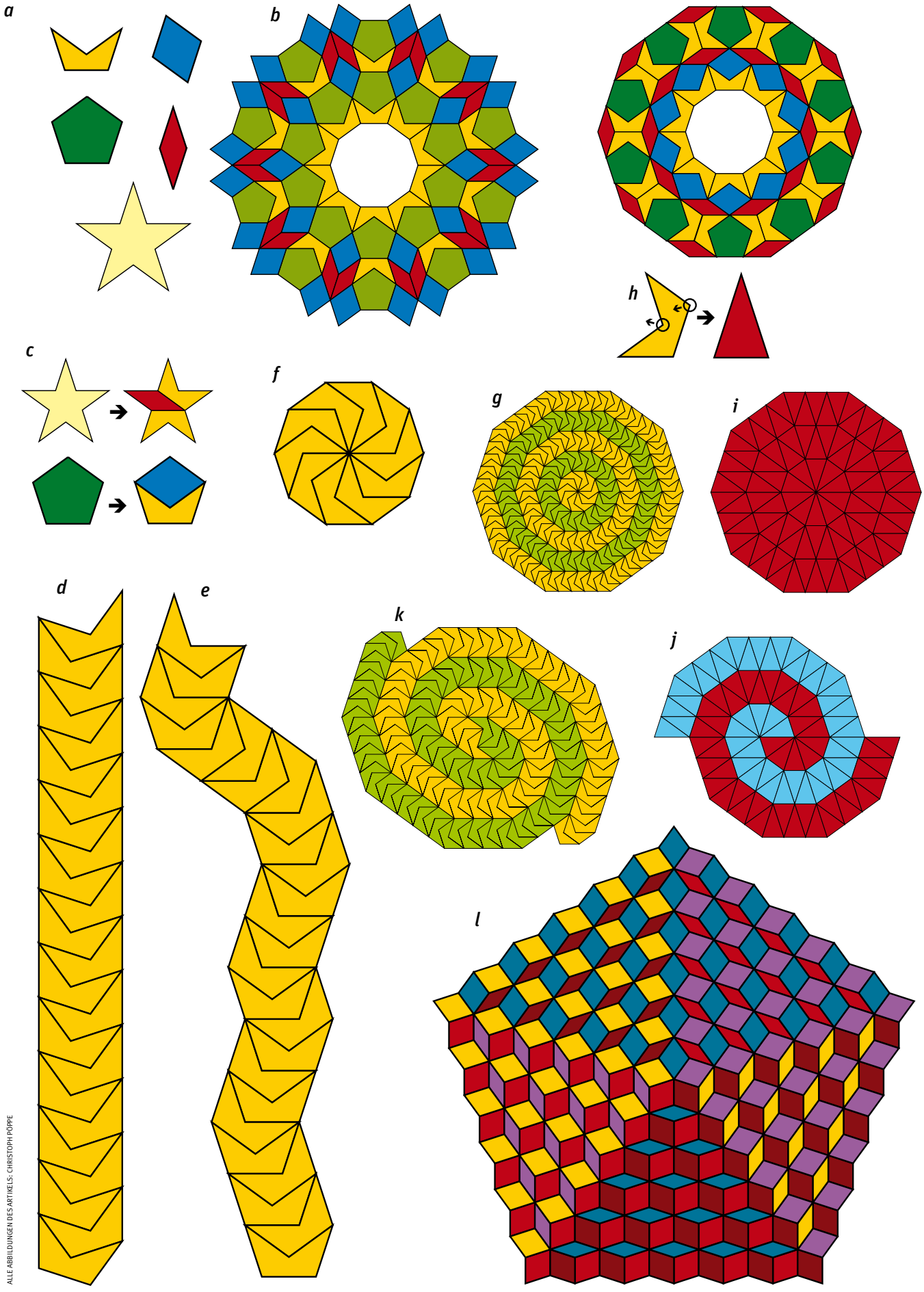
Man finde zu jedem Pflasterstein eines Sortiments eine Zerlegung in kleinere Pflastersteine desselben Sortiments.

Inzwischen gibt es zu Penrose-Parketten eine umfangreiche Theorie, die sogar eine physikalische Anwendung hat: Quasikristalle sind Festkörper, in denen die Anordnung der Atome – zum Beispiel – fünfzählige Symmetrie aufweist. Also können diese Atome nicht, wie bei einem gewöhnlichen Kristall, periodisch im Raum liegen, sondern müssen sich nichtperiodisch zusammengefunden haben. Demnach könnte die Theorie der Penrose-Parkette, auf drei Dimensionen erweitert, die Struktur der Quasikristalle beschreiben (Spektrum der Wissenschaft 7/1999, S. 14, und 2/2002, S. 64).

Von Penrose zu Hartmann

Diese große Masse an Theorie hatte ich im Sinn, als Mukundi Hartmann mir die von ihm entdeckten Parkette mit der Krone zeigte. Entsprechend versuchte ich die Krone mit den oben genannten Standardsteinen der fünfzähligen Parkette zu kombinieren. Einige Ergebnisse habe ich vor drei Monaten auf der Website dieser Zeitschrift online vorgestellt (»Pflastern Sie mit!« unter »Spektrum Notizen«).

Das sieht zwar zum Teil ganz hübsch aus (Bild rechts, *b*). Aber indem ich das große Sortiment der Standardsteine noch um die Krone erweiterte, wuchs auch die Unübersichtlichkeit. Man kann zwar das Sortiment verkleinern, etwa indem man jedes Fünfeck durch eine Krone und eine dicke Raute ersetzt und jedes Pentagramm durch zwei Kronen und eine dünne Raute *(c)*; aber dabei geht unweiger- ▷



ALLE ABBILDUNGEN DES ARTIKELS: CHRISTOPH PÖPPE

Die Substitutionsregel von Willi Jeschke: Ersetze eine Krone und eine halbe dicke Raute durch viele kleine Versionen dieser Pflastersteine.

▷ lich die Symmetrie des ursprünglichen Pflastersteins verloren, und man weiß nicht, für welche der fünf Ersetzungsmöglichkeiten man sich entscheiden soll.

Interessanter finde ich inzwischen den puristischen Standpunkt: Man lege Parkette mit der Krone als einzigem Pflasterstein. Zu diesem Meinungswechsel hat wesentlich die Webseite »Parkettierungen und Primzahlen?« von Willi Jeschke beigetragen. Dort finden sich nämlich puristische Parkette in ungeheurer Vielfalt.

Die Rauten der Penrose-Parkette tragen an ihren Seiten noch gewisse Markierungen, etwa Aus- und Einbuchtungen, die erzwingen, dass ein mit ihnen gelegtes Parkett nichtperiodisch ist. Solche Markierungen verhindern zum Beispiel, dass man einfach lauter dicke Rauten periodisch nebeneinanderlegt. Wenn das erlaubt wäre, würde die schiere Anarchie ausbrechen. Und genau das passiert, zum Vergnügen des spielerisch veranlagten Fliesenlegers, mit der Krone.

Man kann nämlich Kronen in periodischer Weise – eine rechts, eine links – zu einem Streifen in der Ebene aufstapeln (Bild S. 99, *d*). Diese Streifen kann man nebeneinanderlegen, parallelverschoben oder kopfstehend, und obendrein beliebig gegeneinander verschieben. Nur Puristen verlangen, dass eine Ecke nicht mitten auf eine andere Seite treffen soll. Außerdem kann man, einmalig oder regelmäßig, von dem strengen Rechts-links-Schema abweichen mit dem Effekt, dass aus dem Streifen ein beliebig oft geknickter Wurm wird *(e)*.

Will man es aber ganz unperiodisch haben, empfiehlt es sich, zunächst zehn Kronen zu einem regelmäßigen Zehneck zu vereinen *(f)*. Um diese Zentralfigur lassen sich beliebig viele Ringe aus Kronen legen; jeder Ring kann auch noch unabhängig von allen anderen durch sein Spiegelbild ersetzt werden *(g)*. Und das ist noch lange nicht alles.

Für einen besseren Überblick empfiehlt es sich, anstelle der Krone über ein gleichschenkliges Dreieck mit dem Scheitelwinkel 36 Grad (eine halbe dünne Raute) nachzudenken. Es entsteht aus der Krone, indem man zwei ihrer fünf Ecken (umkringelt in *h)* weglässt und die zugehörigen Seiten gummibandartig zu jeweils einer zusammenschnurren lässt. Umgekehrt macht man aus einem solchen Dreieck eine Krone, indem man seine beiden langen Seiten geeignet ausbeult.

Puristische Pflasterungen – regelmäßig und chaotisch

Aus solchen Dreiecken nichtperiodische Muster zu legen ist nicht schwer. Man lege zehn von ihnen mit den Scheitelwinkeln in einem Punkt zusammen, sodass ein Zehneck entsteht. Eine Substitutionsregel ist ebenfalls schnell gefunden: Man unterteile ein Dreieck durch Parallelen zu den Seiten in vier kleinere Dreiecke. Wendet man die Substitution mit anschließender Vergrößerung hinreichend oft an, so erhält man ein beliebig großes Zehneck aus Dreiecken *(i)*. Durch Ausbeulen entstehen daraus das Zehneck aus Kronen und viele Ringe drumherum.

Wer weit draußen in der Ebene sitzt und nicht bis zu einer der Linien sehen kann, welche die ursprünglichen Dreiecke voneinander trennen, wird glauben, er befinde sich in einem periodischen Parkett. Eine Variante dieses Parketts, die aus dünnen und dicken Rauten (spitzer Winkel 36 beziehungsweise 72 Grad) besteht, spielt auf heimtückische Weise mit der Wahrnehmung des Betrachters: In jedem der fünf Sektoren kann er mühelos glauben, er schaue auf treppenförmig angeordnete Würfel. Aber an den Grenzen bricht diese Illusion zusammen *(l)*.

Ein Beobachter mitten in einem solchen periodischen Teilfeld merkt vielleicht gar nicht, dass die obere und die untere Hälfte des ursprünglichen Parketts gegeneinander verschoben wurden und die ringförmige Anordnung der Dreiecke einer Spirale gewichen ist *(j)*. Erstaunlich: Auch diese Anordnung lässt sich widerspruchsfrei zu Kronen ausbeulen.

Diese Konstruktion hängt, wie einige andere, nicht an der Fünfersymmetrie. Man kann auch 14 entsprechend schmalere Dreiecke zu einem Vierzehneck zusammenlegen und jedes Dreieck in viele seinesgleichen verwandeln. Das Siebener-Äquivalent der Krone ist ein Siebeneck, bei dem drei Seiten nach innen umgestülpt sind.

Überhaupt Spiralen! Man hänge zwei Kronen – Spitze auf einspringende Ecke – ineinander und baue auf beiden den gleichen Wurm auf. Wenn man es geschickt anstellt, umschlingen die Würmer einander bis ins Unendliche, ohne je Lücken zwischen sich zu lassen *(k)*.

Willi Jeschke weiß auch zu berichten, dass man mit Aussicht auf Erfolg einfach irgendwie chaotisch die Ebene mit Kronen zupflastern kann. Manchmal muss man allerdings ein Stück bereits verlegtes Pflaster herausreißen und anders wieder einsetzen, weil sich sonst unfüllbare Lücken auftun.

Eine Substitutionsregel für die Krone selbst kann es eigentlich nicht geben. Jeder Versuch, eine Krone mit kleinen Krönchen zu füllen, endet alsbald in einer ungefüllten und unfüllbaren Lücke. Aber wenn man die puristische Grundhaltung ein bisschen lockert, geht es. Das Sortiment aus der Krone und einer halben dicken Raute erlaubt eine Substitution durch kleinere Steine desselben Sortiments (Bild oben). Allerdings sind die kleinen Steine schon sehr klein. Bereits nach zwei Substitutionsschritten sieht das Muster sehr chaotisch aus, obgleich es streng nach einer – doppelt angewandten – Regel gebaut ist.

Vielleicht sollten sich die Fliesenleger doch für die Krone erwärmen. Sie bietet ihnen so viel künstlerische Freiheit, dass man in seinem Berufsleben nie in die Verlegenheit kommen wird, dasselbe Muster zweimal zu legen. ◁

Christoph Pöppe ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/874893.

AUTOR

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

JANE GOODALL INSTITUTE / MICHAEL NEUGEBAUER

Fühlen Tiere wie wir?

Menschliche Verhaltensweisen und Motive lassen sich nicht so klar von denen der Tiere abgrenzen, wie viele glauben wollen.

Von G. A. Bradshaw
und Robert M. Sapolsky

Im Jahr 1974 sorgte eine Meldung der Schimpansenforscherin Jane Goodall für Aufregung. Die Affen am Gombe-Fluss in Tansania, so hieß es darin, würden Kindsmord verüben und gegeneinander Krieg führen. Vor allem schreckten die Menschen damals auf, weil beides bis dahin als genuin menschlich galt. Die Exzesse, welche die Primatologin beschrieb, schlossen aber die noch verbliebene vermeintliche Kluft zwischen dem *Homo sapiens* und den übrigen Arten.

Viele Ähnlichkeiten zwischen Mensch und Tier überraschen uns längst nicht mehr. Schon lange gewinnen Wissenschaftler Erkenntnisse an Tieren anstelle des Menschen. Biomedizin und Anthropologie stützen sich darauf. Die meisten von uns akzeptieren inzwischen, dass wir mit anderen Arten gemeinsame Vorfahren hatten. Auf dieser Annahme baut das System der wissenschaftlichen Schlussfolgerungen in Biologie und Psychologie auf. Wegen dieser Einsicht profitiert der Mensch von Tierforschung. So alarmierte an Jane Goodalls neuen Beobachtungen denn auch nicht, dass sich Schimpansen und Menschen überhaupt in vielem verblüffend ähneln. Sondern, wie weit sich solche Ähnlichkeit tatsächlich erstreckt, das war es, was die meisten unerwartet traf.

Denn plötzlich verschwand eine entscheidende Grenze zwischen tierischem Verhalten und menschlichem Handeln, zwischen der Natur und dem Menschen. Psychische Gemeinsamkeiten hatten die Behavioristen bisher nur für die Instinkte angenommen. Einen anderen Menschen umzubringen war ein dem Willen unterstellter Akt und damit Mord. Wenn Tiere einander beim Revierkampf oder Wettbewerb um Paarungspartner töteten, war das Instinkt. Nur Menschen konnten morden. Auch Kindsmord – Infantizid – kam in diesem Weltbild in der Natur nicht vor.

Unser Wissen über uns selbst und andere Arten hat sich in den letzten Jahrzehnten grundlegend geändert. So manches, was unserem Leben Gehalt gibt, entdeckten Forscher nun auch bei Tieren: Delfine lehren ihre Jungen kulturelle Bräuche; Tintenfische besitzen persönliche Charaktere; Ratten haben einen gewissen Sinn für Belustigung. Nicht zuletzt die Hirnforschung trug viel zu der Einsicht bei, dass auch psychische Elemente über die Arten weitergetragen werden – was somit Jane Goodalls Deutung untermauert.

Dabei ist diese Vorstellung nicht neu. Hierüber hat sich im Jahr 1872 bereits Charles Darwin ausgelassen. In einigen Forschungsrichtungen ging diese Einsicht aber wieder verloren. Doch jetzt bröckeln die alten Fronten im Streit um Erbe oder Umwelt. Die Modelle zum tierischen und menschlichen Verhalten werden zusammengeführt. Diverse Erscheinungen in der Tierwelt, die Forscher bisher als abnorm und absonderlich abtaten, lassen sich nun in einer artübergreifenden Theorie integrieren, die Körper und Geist umfasst und den Menschen einschließt.

Zu manchen herkömmlichen Denkmustern passten Goodalls Beobachtungen ganz und gar nicht. Was sich jetzt anzubieten schien, nämlich Erkenntnisse über die Hintergründe menschlicher Aggression auf gewalttätige Schimpansen anzuwenden, galt bisher als völlig unstatthaft, ja frevelhaft. Erlaubt war früher allenfalls, manchmal von Tieren auf den Menschen zu schließen. Die amerikanische Wissenschaftshistorikerin Lorraine Daston vom Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte in Berlin und ihr Fachkollege Gregg Mitman von

Erkenntnisse über menschliche Aggression auf gewalttätige Schimpansen anzuwenden, galt früher als frevelhaft

der Universität von Wisconsin in Madison schrieben dazu kürzlich dem Sinn nach:

> Tierverhaltensforscher, und selbst Primatologen, die mit uns eng verwandten Affen arbeiten, haben es sich über lange Zeit zur strengen Regel gemacht, keine menschlichen Gefühle in Tiere hineinzudeuten, wenn diese sich menschenähnlich benahmen. Selbst noch in jüngerer Zeit reagierten viele Forscher konsterniert und abwehrend, sobald die Rede auf Geisteszustände bei Tieren kam.

Anscheinend hatten die Forscher dieses Tabu so stark verinnerlicht, dass nur selten wissenschaftliche Arbeiten auftauchten, deren Verfasser es missachteten. Das Denkverbot war und ist auch einer der Gründe, weswegen die Presse so gern Berichte über mordende Schimpansen, lachende Mäuse und einfühlsame Schafe aufgreift. Derlei passte bisher nicht ins Weltbild. Heute werden aus Verhaltenserscheinungen, die früher als Abart und Sonderfall galten, die Grundfesten der Psychobiologie gebaut. Die Grenzen haben sich verschoben, wann es zulässig ist, vom Menschen auf Tiere zu schließen und umgekehrt. Zudem sind beide Richtungen gleichwertig. Auch das untermauert die Hirnforschung.

Ähnliche Gene – gleiches Verhalten?

Schlüsse über Artgrenzen hinweg können gelingen, weil viele Merkmale erhalten bleiben, wenn sich Evolutionslinien getrennt weiterentwickeln. Auf Genomebene teilen Schimpanse und Mensch miteinander etwa 96 Prozent ihres Erbguts, an Genen für Proteine sogar 99 Prozent. Zum Beispiel haben sich die Erbanlagen für die grundlegende Hirnsegmentierung während der gesamten Wirbeltierevolution wenig verändert. Es leuchtet ein, dass bei ähnlichen Genen ähnliche Strukturen entstehen.

Doch gilt das Gleiche für Verhalten? Laufen in homologen – abstammungsverwandten – Hirnregionen der Wirbel- oder zumindest Säugetiere ähnliche neuronale Prozesse ab? Die Antwort hierauf fällt nicht leicht. Vergliche man zwei Computer-»Gehirne«, dürfte man wohl erwarten, dass die gleiche Konstruktion und Ausstattung ähnliche »physiologische« Erscheinungen erzeugt. Doch wenn zwei neuronale Strukturen gleich aussehen, bedeutet das nicht zwangsläufig, dass sich beide gleich verhalten. Selbst wenn zwei Arten über eine im Aufbau gleiche Hirnregion verfügen, könnte zum Beispiel deren Größe relativ zum Gehirn anders sein. Dennoch erfüllen homologe Strukturen oft gleiche Funktionen. Man betrachte nur das basale Vorderhirn und den Mandelkern – zwei Hirngebiete, die bei vielen Tieren für manches grundlegende Verhalten unerlässlich sind: so für das Erkennen von Geschlechtspartnern oder Konkurrenten, für Balz, Paarung und elterliche Fürsorge oder für Aggression und Territorialverhalten.

Zwar treten auch beim Gehirn Einzelphänomene auf, diese sind aber selten. Im Rückenmark einiger Fische und Amphibien etwa gibt es die Mauthner-Zellen. Die menschliche Vorderhirnrinde besitzt einen einzigartigen Zelltypus. Vereinzelt entwickelten sich besondere neuartige Sinnessysteme, so der elektrische Sinn mancher Fische, oder Spezialisierungen wie die Echoortung bei Fledermäusen. Dergleichen sind offensichtlich Anpassungen an spezielle Nischen, in denen diese Tiere leben.

Doch selbst diese Phänomene kamen keineswegs aus dem Nichts, sondern stehen über ihre phylogenetische Herkunft mit anderen Merkmalen in Verbindung. Es bleibt dabei: Aus Evolutionssicht besteht kein Grund, beim Schließen über Artgrenzen hinweg die eine oder andere Blickrichtung zu bevorzugen. Im Übrigen sind Verhaltensmuster oft beständig genug geblieben, um Erscheinungen bei verschiedenen Arten mit denselben Begriffen und Konzepten fassen zu können. Was bedeutet das nun für die praktische Forschung? Woher weiß man im Einzelfall, ob man es mit einer artspezifischen Besonderheit oder einem allgemeineren Phänomen zu tun hat?

Hier helfen bestimmte Grundregeln. Durch Überprüfung mit akzeptiertem Wissen scheidet die Wissenschaft ständig stärkere von schwächeren Hypothesen ab. Eine Hypothese gilt als wahr, wenn es nicht gelingt, sie zu widerlegen, und umgekehrt. Doch können zweierlei Irrtümer unterlaufen. Man kann eine an sich wahre Hypothese verwerfen oder eine unwahre anerkennen. Statistiker nennen das »Typ I«- beziehungsweise »Typ II«-Irrtum. Hierzu ein Beispiel zu unserem Thema, der Übertragung von menschlichen Eigenschaften auf Tiere: gesetzt, auch manche Affen könnten Empathie empfinden – mit anderen mitfühlen. Ein Forscher, der sich weigert, diese hier einmal angenommene Gemeinsamkeit mit dem Menschen zu akzeptieren, beginge einen ▷

Die Forscherin Jane Goodall entdeckte bei den Schimpansen des Gombe-Reservats in Tansania, dass diese Menschenaffen uns auch im Denken und Fühlen in vielem stark ähneln. Hier stimmt die Forscherin in die Rufe des verwaisten Affen Uruhara ein, der im Sweetswaters-Schutzgebiet in Kenia lebt.

▷ »Typ I«-Irrtum. Diesen Fall nennt der Primatenforscher Frans de Waal von der Emory-Universität in Atlanta (Georgia) »Anthropoleugnung«. Im anderen Extrem, beim Typ-II-Fehler, spricht er von »Anthropomorphismus«: Das wäre der irrige Glaube, dass der Mensch eine bestimmte Eigenschaft mit Tieren teilt, obwohl es nicht zutrifft.

Nach der Evolutionstheorie sollten Arten mit relativ nahen gemeinsamen Vorfahren eher Merkmale teilen als Arten, die miteinander entfernter verwandt sind. Natürlich garantiert eine bis vor Kurzem gemeinsame Geschichte keine völlige Gleichheit. Aber auch das Gegenteil darf man nicht vorschnell annehmen. Es wäre somit ebenso unsinnig, zwei Arten blindlings in einen Topf zu werfen, wie sie unbesehen als zwei Paar Stiefel zu betrachten. Sofern allerdings morphologische, physiologische und genetische Eigenschaften dafür sprechen, dass zumindest auf diesen Ebenen große Gemeinsamkeiten bestehen, darf man der geistigen Ebene Gleiches nicht einfach absprechen. Sonst leistet man Typ-I-Irrtümern und damit einer längst unzeitgemäßen Theorie Vorschub.

Ein artübergreifendes Konzept, das keine Blickrichtung diskriminiert, zahlt sich in Theorie und Praxis aus. Die Aussagen werden schärfer, die Ergebnisse differenzierter. Außerdem könnten sich Forscher verschiedener Disziplinen, etwa Ethologen und Psychologen, leichter verstehen, weil sie dieselben Theorien benutzen und dieselbe Sprache sprechen.

Jedoch stehen auch schwierige Entscheidungen an. Der amerikanische Wissenschaftstheoretiker Thomas Kuhn (1922–1996) nannte es einen Paradigmenwechsel, wenn Erkenntnisse nicht mehr zu den alten Modellen passen und stattdessen neue für sie entwickelt werden. In dem Sinn ist es eine wissenschaftliche Revolution, dass die Neuroethologie den *Homo sapiens* ins Tierreich eingliedert. Wie früher in ähnlichen Fällen auch hat das für viele Bereiche unseres Lebens und Denkens bedeutende Auswirkungen. Denn um die Begriffssysteme und Theorien einander anzugleichen, müssen die einzelnen wissenschaftlichen Disziplinen alte, oft lieb gewordene Gewohnheiten, Denkweisen und Überzeugungen aufgeben. Fällt die künstliche Barriere zwischen dem Menschen und den anderen Arten, sind die Wissenschaftler mit widersprüchlichen Konzepten konfrontiert, und ihnen werden unbequeme Entscheidungen abverlangt.

Mord unter Schimpansen ist hierfür ein treffliches Beispiel. Wenn Menschen einander umbringen, gilt das als kriminell und pathologisch. Wären mordende Affen also praktisch Verbrecher? Oder sollten wir unseren Begriff davon, was bei den Primaten (einschließlich dem Menschen) zum »natürlichen« Verhalten gehört, weiter fassen? Nun argumentieren Evolutionsbiologen, bei Schimpansen sei Kindsmord möglicherweise eine evolutionär angepasste Fortpflanzungsstrategie. Gleiches Verhalten beim Menschen werten Juristen, Anthropologen und Psychiater dagegen als abnorm. Folglich wäre für ein artübergreifendes Modell zu klären, ob das Töten bei den Affen nun gestörtes oder adaptives Verhalten ist – und dann zu untersuchen, ob die gleiche Antwort auch für den Menschen zutrifft.

Weniger weit hergeholt ist das Paradox, am Tiermodell zum Beispiel physiologische Mechanismen zu erforschen. Hier prallen Anthropoleugnung und Anthropomorphismus aufeinander. Denn einerseits dürfen Tierversuche sein, weil sich die Tiere grundsätzlich von uns unterscheiden, andererseits ähneln sie uns aber genug für aussagekräftige Studien.

Nicht die Krone der Schöpfung

Heiße Grundsatzdebatten wie diese, an sich normal im Wissenschaftsbetrieb, würden von der Öffentlichkeit vielleicht gar nicht groß beachtet, wenn das Thema uns nicht so stark innerlich aufwühlte. Von alten Vorurteilen trennt man sich eben nicht gern. Seit Jahrhunderten oder auch Jahrtausenden sieht sich der Mensch als über die Tiere gestellt. Richard Dawkins nennt das »Tyrannei des abgehobenen/überheblichen Geistes«. Im Mittelalter gab es die Vorstellung, der Mensch rangiere in der Lebenskette über den Tieren und unterhalb der Engel. Der Parasitologe Sean Nee von der Universität Edinburgh schreibt diesen Hang des Menschen zur Selbstabgrenzung einer tief sitzenden Angst vor allzu viel Ähnlichkeit mit anderen Wesen zu. Wer Vergleiche anstellt, sägt am Glauben an die menschliche Überlegenheit und bedroht das Selbstverständnis jener, die sich dieser Sichtweise verschrieben haben.

Dreißig Jahre ist es her, als wegen Goodalls Schimpansen ein radikales wissenschaftliches Umdenken einsetzte. Gewissermaßen läuteten jene denkwürdigen Beobachtungen sogar einen krassen Kulturwandel ein, sie führten nämlich zu einem neuen Begriff von uns selbst. Theorie- und Datenentwicklung legen seither ein solches Tempo vor, dass die Zukunft weitere derartige Entwicklungen verheißt. Schlüsse zwischen Mensch und Tier in beiden Richtungen zuzulassen dient dem Erkenntnisgewinn, theoretisch wie praktisch. Nicht zuletzt gilt mit Kuhn: Wie viel Aufruhr, wie viel wütende Proteste ein solcher Wandel auch provoziert, wie viel Ängste er schüren mag – was Wissenschaft unter anderem so wertvoll macht, ist doch gerade, dass solche Paradigmenwechsel möglich sind. ◁

G. A. Bradshaw ist außerordentliche Professorin am Pacifica Graduate Institute in Santa Barbara (Kalifornien) und an der Oregon-State-University in Corvallis. **Robert M. Sapolsky** ist Professor für Biowissenschaft und Neurologie an der Stanford-Universität (Kalifornien) sowie Mitarbeiter am Institut für Primatenforschung der Nationalmuseen Kenias in Nairobi.

© American Scientist (www.americanscientist.org)

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

The how and why of thinking with animals. Einleitung von L. Daston und G. Mitman in: Thinking with animals: New perspectives on anthropomorphism. Von L. Daston und G. Mitman (Hg.). Columbia University Press, New York 2005

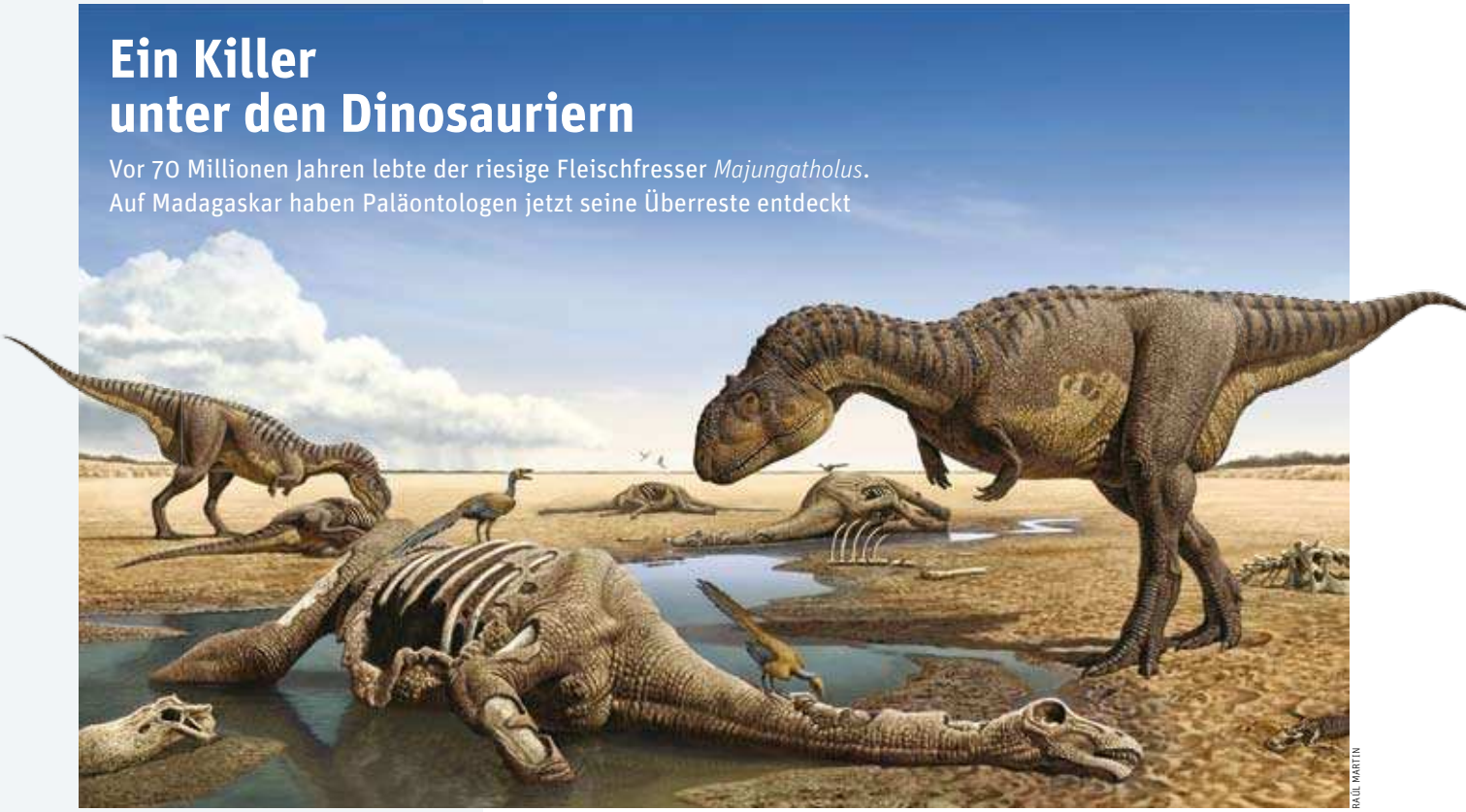
The great chain of being. Von Sean Nee in: Nature, Bd. 435, S. 429, 26. Mai 2005

The ancestor's tale. Von Richard Dawkins. Houghton Mifflin, New York 2004

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/874891.

Ein Killer unter den Dinosauriern

Vor 70 Millionen Jahren lebte der riesige Fleischfresser *Majungatholus*. Auf Madagaskar haben Paläontologen jetzt seine Überreste entdeckt

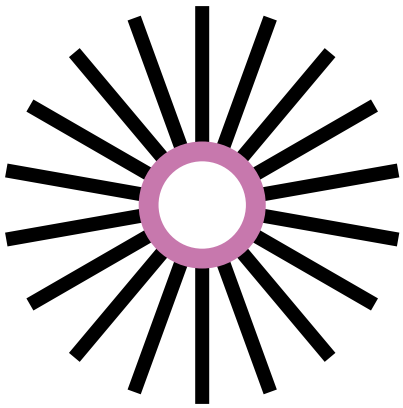


RAUL MARTIN

WEITERE THEMEN IM AUGUST

Lego mit Molekülen

Chemiker haben einen Satz molekularer Bauklötzchen in den verschiedensten Formen konstruiert. Diese lassen sich zu Nanostrukturen beliebiger Gestalt zusammenfügen



J. WERNER, B. PINNA, L. SPILLMANN

Farbige Illusionen

Unser Hirn nimmt die Welt der Farben nicht getrennt von der der Formen wahr. Spezielle optische Täuschungen beweisen das

Neutrinos am Südpol

Im Eispanzer der Antarktis entsteht eines der weltweit größten Teleskope. IceCube soll das Geheimnis der kosmischen Strahlung lüften

DESY ZEUTHEN

Möchten Sie stets über die Themen und Autoren eines neuen Hefts auf dem Laufenden sein?

Wir informieren Sie gern per E-Mail – damit Sie nichts verpassen!

Kostenfreie Registrierung unter:

www.spektrum.com/newsletter

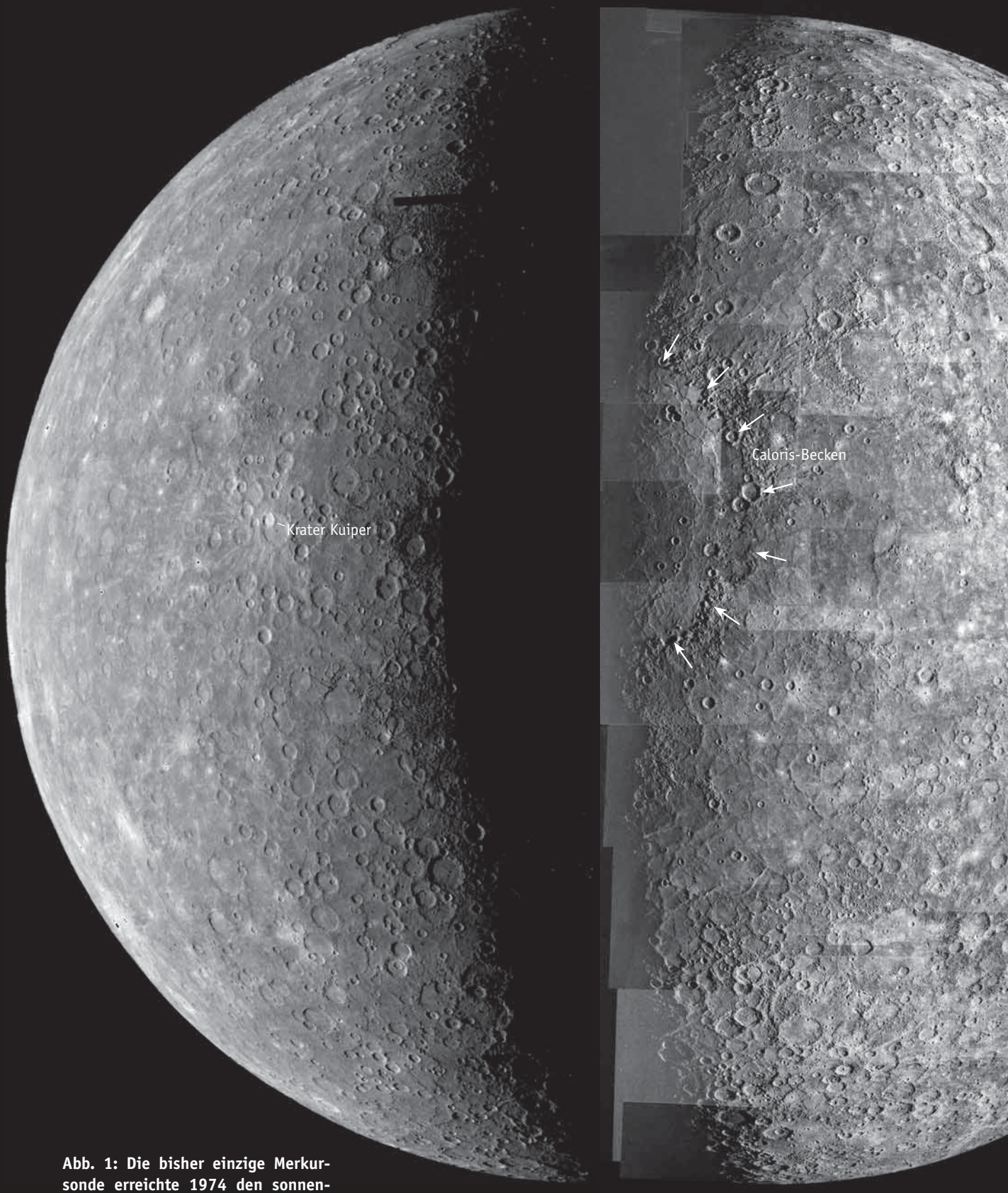
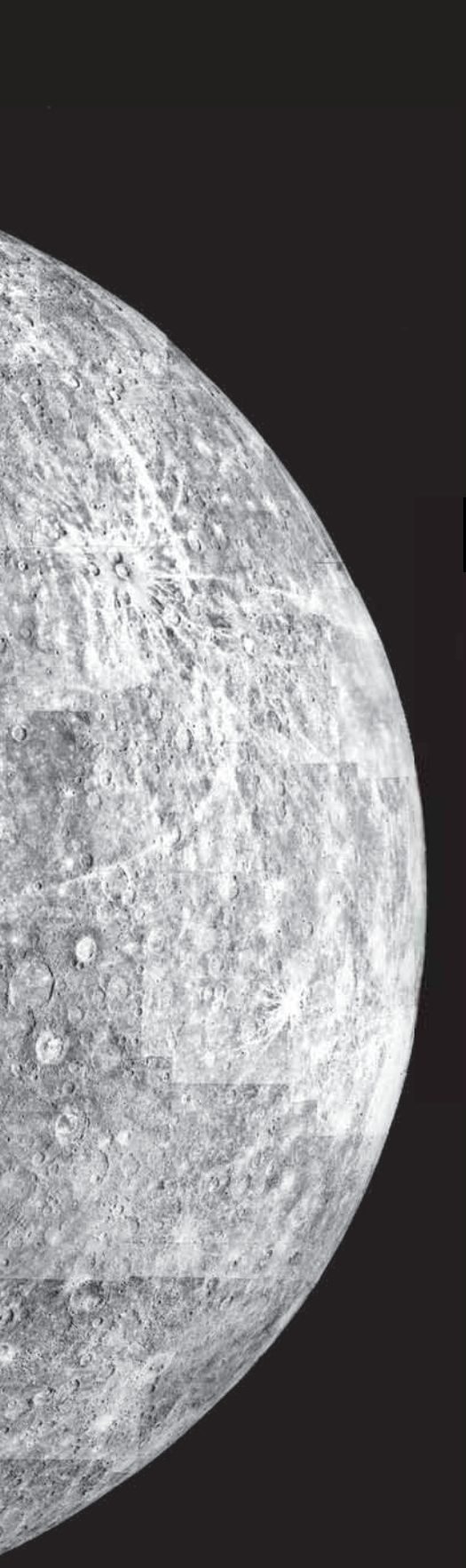
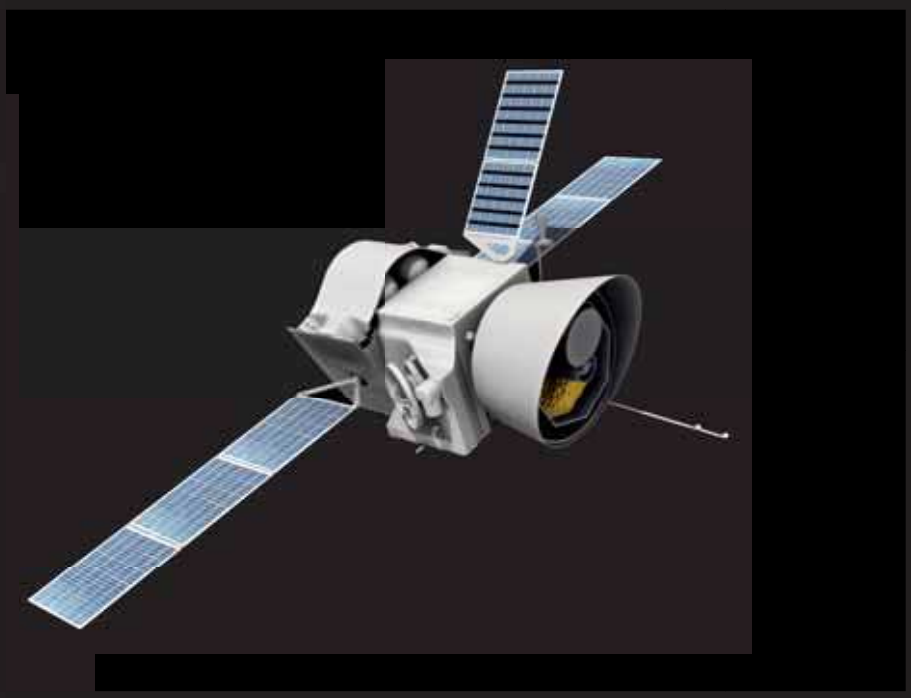


Abb. 1: Die bisher einzige Merkursonde erreichte 1974 den sonnennächsten Planeten: MARINER-10 kartierte etwa 45 Prozent der Oberfläche Merkurs. Das linke Bild entstand beim Anflug, das rechte beim Abflug. Der Krater Kuiper ist etwa 60 Kilometer groß, während das Caloris-Becken (Pfeile), die größte bekannte Einschlagstruktur auf dem Planeten, 1300 Kilometer misst.

NASA/ESA





Die Merkursonde BepiColombo

Ein vergessener Planet wird erforscht

VON TILMANN ALTHAUS

Im Jahre 2013 soll eine Sojus-Trägerrakete eine besondere Fracht ins All bringen: BepiColombo, eine europäische Raumsonde zur Erkundung des Merkur. Sie wird nach sechs Jahren Flugzeit im März 2019 beim sonnennächsten Planeten ankommen und ihn für mindestens ein Jahr aus der Nähe erforschen. Im April 2007 wurde nun das endgültige Konzept und der Ablauf der Mission festgelegt.

Von den seit der Antike bekannten fünf klassischen Planeten ist Merkur der am schwierigsten zu beobachtende Himmelskörper. Aufgrund seines geringen Abstands zur Sonne entfernt er sich nie weit vom strahlenden Tagesgestirn und lässt sich von Mitteleuropa aus nur für kurze Zeit am Morgen- oder Abendhimmel knapp über dem von der Dämmerung aufgehellten Horizont beobachten.

So ist es nicht verwunderlich, dass Jahrhunderte teleskopischer Beobachtung neben der Sichelgestalt nur einige wenige verwaschene Flecken auf seiner hellgrau wirkenden Oberfläche enthüllten. Erst in den Jahren 1974 und 1975 änderte sich dies, als der Planet aus der Nähe von der ersten und bislang einzigen Raumsonde, MARINER-10, bei drei Vorbeiflügen etwa zur Hälfte erkundet wurde. Die Bilder enthüllten eine kraterbedeckte Oberfläche, die auf den ersten Blick derjenigen unseres Mondes zum Verwechseln ähnlich sieht (Abb. 1).

Seit mehr als 32 Jahren erhielt der sonnennächste Planet keinen Besuch mehr von der Erde; er wurde von den meisten Planetenforschern »vergessen«, die sich Mars, Venus oder den Gasriesen mit ihren Monden im äußeren Sonnensystem widmeten. Seit einigen Jahren erwacht nun wieder das Interesse. Im Jahre 2004 startete die US-Raumfahrtbehörde NASA die kleine Raumsonde MESSENGER, die im Jahre 2009 in eine Umlaufbahn um den innersten Planeten eintreten soll.

Ein noch wesentlich ambitionierteres Projekt plant nun die Europäische Weltraumbehörde ESA: Die Mission BEPICOLOMBO macht sich im August 2013 auf den Weg zum Merkur und wird dort nach einem sechsjährigen Flug im März 2019 eintreffen (Abb. 2).

Die Vorgeschichte

Im Jahre 2001 beschloss die ESA, eine Raumsonde zum Planeten Merkur im Rahmen einer »Cornerstone-Mission« zu bauen. Diese sind die größten und teuersten Projekte im Rahmen des unbemannten wissenschaftlichen Programms der ESA. Sie können bis zu einer Milliarde Euro kosten und werden von allen ESA-Mitgliedern im Rahmen ihres Pflichtbeitrags finanziert. Der Budgetrahmen von BEPICOLOMBO liegt aber mit insgesamt 550 Millionen Euro einschließlich Start und Betrieb deutlich unter dieser Marke.

Die ersten Vorstudien zu einer europäischen Merkurmission fanden bereits 1993 statt. Seit dieser Zeit wurden die Vorschläge immer weiter verfeinert und führten 2001 schließlich zum Projekt BEPICOLOMBO. Noch im gleichen Jahr trat man an die japanische Weltraumbehörde JAXA (Japanese Aerospace Exploration Agency), heran, ob sie sich an diesem Projekt beteiligen wolle. Die JAXA hatte schon längere Zeit die Möglichkeit eines eigenen Flugs zum innersten Planeten untersucht und bot gerne den Bau einer Sonde zur Erkundung des Merkurmagnetfelds an.

Ihre Bezeichnung erhielt die Sonde nach dem Spitznamen des italienischen Mathematikers Giuseppe (Bepi) Colombo (1920–1984) von der Universität von Padua. Colombo erklärte in den 1960er Jahren das ungewöhnliche Rotationsverhalten des Merkur und half in den frühen 1970er Jahren der amerikanischen Weltraumbehörde NASA bei der Planung des Flugs von MARINER-10 zu Venus und Merkur.

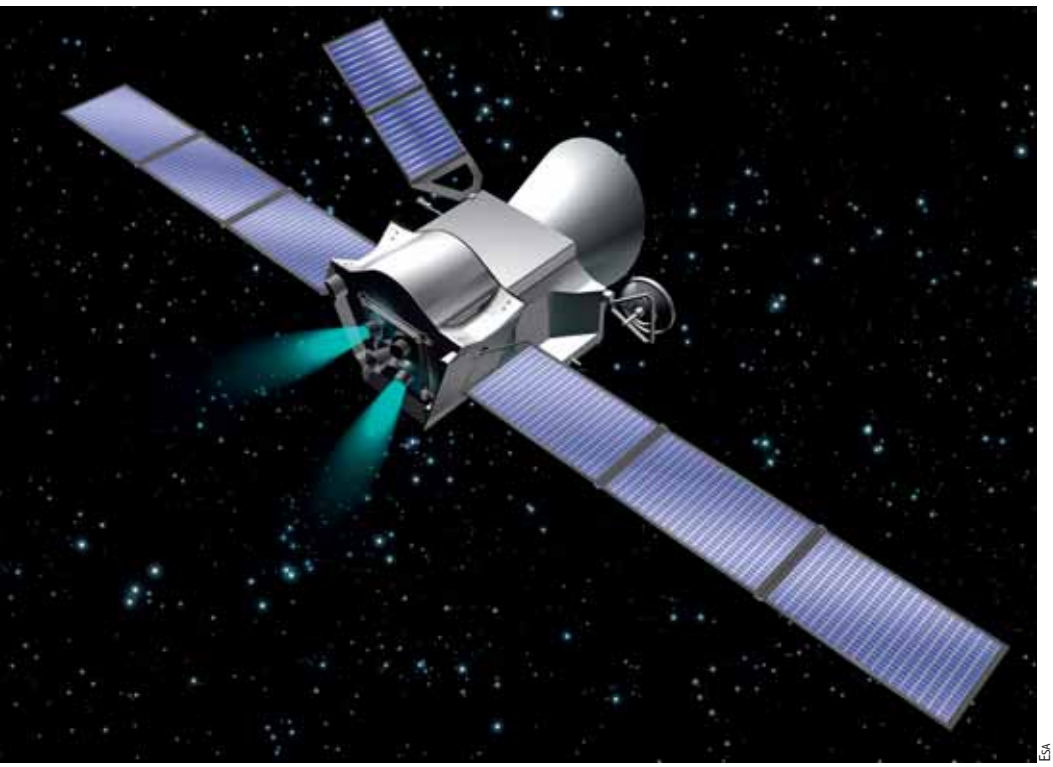
Mit BEPICOLOMBO vervollständigt die ESA ihr Programm zur Erkundung des inneren Sonnensystems. Nach den erfolgreichen Flügen zum Erdmond (SMART-1, 2003), Mars (MARS EXPRESS, 2003) und zur Venus (VENUS EXPRESS, 2005) wäre dann jeder nähere terrestrische Himmelskörper von einer ESA-Sonde im Detail erkundet worden.

Welt der Extreme

Merkur wurde nach dem Götterboten der griechisch-römischen Mythologie benannt. Er ist mit einem Durchmesser von 4880 Kilometern der kleinste Planet des Sonnensystems. Sogar zwei Planetenmonde, der Jupitertrabant Ganymed und der Saturnmond Titan, sind größer als Merkur. Der innerste Planet umläuft in nur 88 Tagen die Sonne auf einer stark elliptischen Umlaufbahn. Dabei schwankt der Sonnenabstand zwischen 46 Millionen Kilometern im Perihel und fast 70 Millionen Kilometern im Aphel (siehe Tabellen auf S. 30).

Lange Zeit ging man davon aus, dass Merkur gebunden rotiert. Er sollte also der Sonne stets die gleiche Seite zuwenden, weil die Dauer von Eigenrotation und Umlaufzeit gleich wären. Umso größer war 1965 die Überraschung, als mit Hilfe des Radioteleskops von Arecibo die Rotationsperiode Merkurs zu 58.8 Tagen bestimmt wurde. Tatsächlich ist die Rotation des innersten Planeten an die Umlaufperiode gekoppelt, denn in zwei Merkurjahren (176 Erdtagen) rotiert Merkur exakt dreimal um seine Achse.

Durch diese Kopplung könnte ein künftiger Astronaut auf dem Merkur kuriose Phänomene beobachten, nämlich doppelte Sonnenauf- und Untergänge. Wenn Merkur das Perihel seiner Bahn durchläuft, ist seine Bahngeschwindigkeit so hoch, dass sie die Rotationsgeschwindigkeit des Planeten überschreitet. Ein Beobachter auf dem 90-Grad-Meridian sähe die Sonne zunächst aufgehen, sie würde danach immer langsamer, bliebe schließlich stehen und sänke wieder unter den Horizont, um dann schließlich endgültig aufzugehen. Auf dem 270-Grad-Meridian wäre dieses Schauspiel in umgekehrter Reihenfolge zu sehen. Nach einem Merkurjahr würde der Beobachter auf dem 90-Grad-Meridian einen doppelten Sonnenuntergang erleben, auf dem



ESA

Abb. 2: Die Raumsonde BEPICOLOMBO ist in Flugkonfiguration etwa 5.2 Meter lang und wiegt rund drei Tonnen.

Abb. 3: Der innere Aufbau von Merkur wird vom mächtigen Eisenkern beherrscht. Schon 500 bis 700 Kilometer unter der Oberfläche wird der Kern erreicht, der rund 70 Prozent der Gesamtmasse des Planeten ausmacht.

270-Grad-Meridian könnte man einen doppelten Sonnenaufgang bewundern. Nach einem weiteren Umlauf wiederholt sich der Vorgang dann in der ursprünglichen Reihenfolge.

Merkur besitzt für einen so kleinen Planeten eine hohe mittlere Dichte. Sie belegt einen großen Anteil an schweren Bestandteilen in seinem Inneren. Berücksichtigt man zusätzlich die Verdichtung des Planeteninneren durch die zum Zentrum hin immer größere Gewichtslast der überlagernden Schichten, so kann man die »unkomprimierte mittlere Dichte« errechnen. Merkur weist von allen Planeten die höchste Dichte auf, da er einen im Verhältnis zum gesamten Planeten sehr großen Eisenkern besitzt.

Die Vorstellungen von seinem inneren Aufbau gehen davon aus, dass er aus einem etwa 500 bis 700 Kilometer mächtigen Gesteinsmantel besteht und der Rest des Planetenvolumens von einem Kern aus Eisen mit einigen Prozent Nickel eingenommen wird (Abb. 3). Etwa siebzig Prozent der Gesamtmasse Merkurs befinden sich im Kern, auf den Gesteinsmantel entfallen nur dreißig Prozent (bei der Erde 62 Prozent). Über die mineralogisch-chemische Zusammensetzung der Merkuroberfläche gibt es kaum Informationen. Ihre Gesteine dürften überwiegend aus Feldspäten und Mineralen der Pyroxengruppe aufgebaut sein, sie sind also irdischem Basalt sehr ähnlich.

Neben der Erde ist Merkur der einzige terrestrische Planet, der ein eigenes Magnetfeld aufweist. Es ist wie das irdische ein Dipolfeld, allerdings liegt seine Feldstärke bei nur etwa einem Prozent des terrestrischen Werts. Das Volumen der Merkurmagnetosphäre beträgt etwa fünf Prozent der irdischen Magnetosphäre.

Ähnlich unserem Mond besitzt Merkur keine nennenswerte Atmosphäre; der Gasdruck von 10^{-15} bar entspricht einem äußerst guten Ultrahochvakuum. Das Gas besteht zu 98 Prozent aus Helium; dieses Edelgas entstammt zum überwiegenden Teil aus dem α-Zerfall von Uran und Thorium in den Gesteinen der Merkuroberfläche.

Weitere Bestandteile der »Merkuratmosphäre« sind Spuren von Wasserstoff und Sauerstoff sowie Atome der gediegenen Alkalimetalle Natrium und Kalium. Letztere werden durch die hohen Oberflächentemperaturen von bis zu 450 Grad Celsius aus den Mineralen wie den Feldspäten regelrecht »ausgeheizt«. Bei dieser Temperatur wäre Blei bereits flüssig. Die freigesetzten Atome verweilen jedoch nicht lange beim Planeten, sondern entweichen ins All.

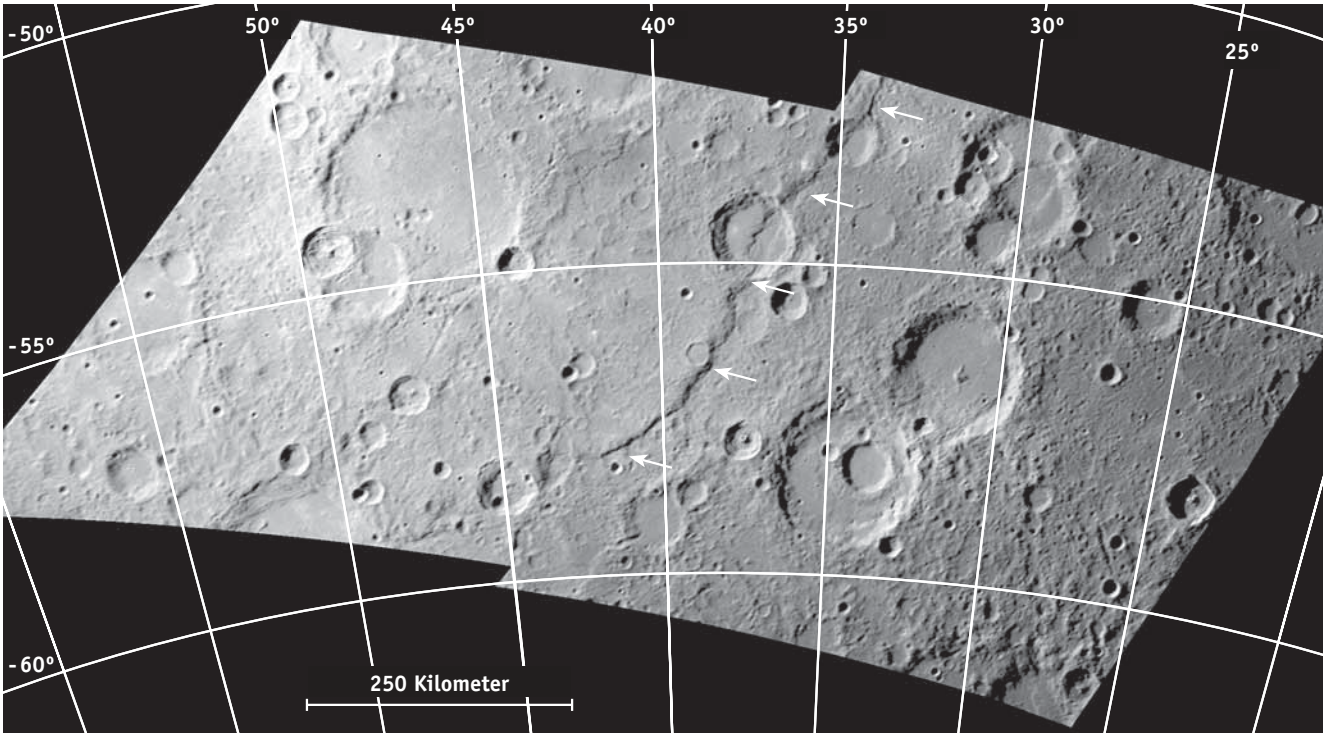
Die erste Vor-Ort-Erkundung: Mariner-10

Fast alles, was wir über die Merkuroberfläche wissen, stammt von den drei Vorbeiflügen der Raumsonde Mariner-10. Am 29. März 1974 näherte sich die Sonde bis auf 694 Kilometer der Merkuroberfläche an. Zwei weitere Vorbeiflüge erfolgten nach jeweils zwei Merkurjahren am 21. September 1974 und am 16. März 1975. Aufgrund der Sonnenumlaufperiode von Mariner-10 von 176 Tagen wies bei allen drei Vorbeiflügen die gleiche Merkurhemisphäre zur Sonne. Nach dem letzten Vorbeiflug war der Treibstoff von Mariner-10 erschöpft und die Sonde wurde abgeschaltet.

Mariner-10 übermittelte insgesamt rund 4400 Bilder, die etwa 45 Prozent der Gesamtoberfläche des Planeten abdecken (Abb. 1). Sie zeigen eine alte, von Einschlagkratern übersäte Oberfläche. Bis zur Grenze der Auflösung der besten Bilder von Mariner-10 von rund 90 Metern dominieren Einschlagkrater die Morphologie der Oberfläche. Die kleinsten Krater sind einfache, schüsselförmige Vertiefungen, größere besitzen Zentralberge und bei den größten Kratern finden sich komplexe Einschlagstrukturen, die aus mehreren konzentrischen Ringen bestehen. Die stark zerkraterten Regionen des Planeten weisen jedoch insgesamt weniger Krater mit einem Durchmesser von bis zu 50 Kilometern als der Erdmond auf. Offenbar ist nicht die gesamte Akkretionsgeschichte erhalten, weil vermutlich in der Frühzeit des Merkur die gesamte Oberfläche erneuert wurde, entweder durch vulkanische Aktivitäten oder durch Auswurfmassen großer Einschlagkrater, welche die kleineren und flacheren älteren Krater auffüllten und überdeckten.

Zwischen den stark zerkraterten Regionen finden sich die »Inter-Krater-Ebenen«. Das sind ebene oder nur sanft hügelige Regionen, die wohl in der Endphase der Planetenbildung vor 4.0 bis 4.2 Milliarden Jahren entstanden. Zu dieser Zeit kam es zum auch von anderen Körpern des Sonnensystems bekannten »späten heftigen Bombardement«, dem Großreinemachen nach der Planetenbildung.

Damals regneten in rascher Folge bei der Akkretion bislang übrig gebliebene Planetesimale auf die Oberflächen der terrestrischen Planeten herab und bildeten dabei die meisten der noch heute sichtbaren Einschlagkrater und Impaktbecken. Auf Mond, Mars und Merkur blieben diese Spuren aus der Jugend gut erhalten, während sie auf Venus und Erde durch die ständige geologische Aktivität ausgelöscht wurden. Auf Merkur finden



sich keine großen vulkanischen Strukturen, große Schildvulkane wie auf Venus, Erde und Mars fehlen völlig.

Merkur besitzt jedoch einzigartige geologische Formationen: langgezogene Verwerfungen, die sich teilweise über 500 Kilometer erstrecken und dabei Höhenunterschiede bis 2000 Meter erreichen (Abb. 4). Diese Verwerfungen durchziehen auch Einschlagkrater: Sie sind also jünger als jene. Die Ursache für ihre Entstehung dürfte das mit Volumenabnahme verknüpfte teilweise Erstarren des Eisenkerns von Merkur sein. Dabei schrumpfte der gesamte Planet um zwei bis vier Kilometer. Hierdurch wurde wie bei einem austrocknenden Apfel die Oberfläche in Falten gelegt, wobei sich die schon verfestigte starre Kruste verwarf.

Eigenschaften des Planeten Merkur

Parameter	Einheit *n*	Merkur	Erde	Verhältnis Merkur/Erde
Masse	10^{24} kg	0.3302	5.9736	0.0553
Volumen	10^{10} km^3	6.085	108.321	0.0562
Durchmesser	km	4880	12756	0.383
Mittlere Dichte [1)]	g/cm^3	5.427	5.520	0.983
Mittlere Dichte [2)]	g/cm^3	5.3	4.1	1.3
Schwerebeschleunigung	m/s^2	3.70	9.78	0.378
Fluchtgeschwindigkeit	km/s	4.3	11.2	0.384
Albedo	Prozent	5.6	38.5	0.145
Sonneneinstrahlung				
im Perihel	W/m^2	14490	1418	9.768
im Aphel	W/m^2	6290	1326	4.786

[1)] gewöhnliche mittlere Dichte; [2)] unkomprimierte mittlere Dichte (siehe Text)

Bahndaten

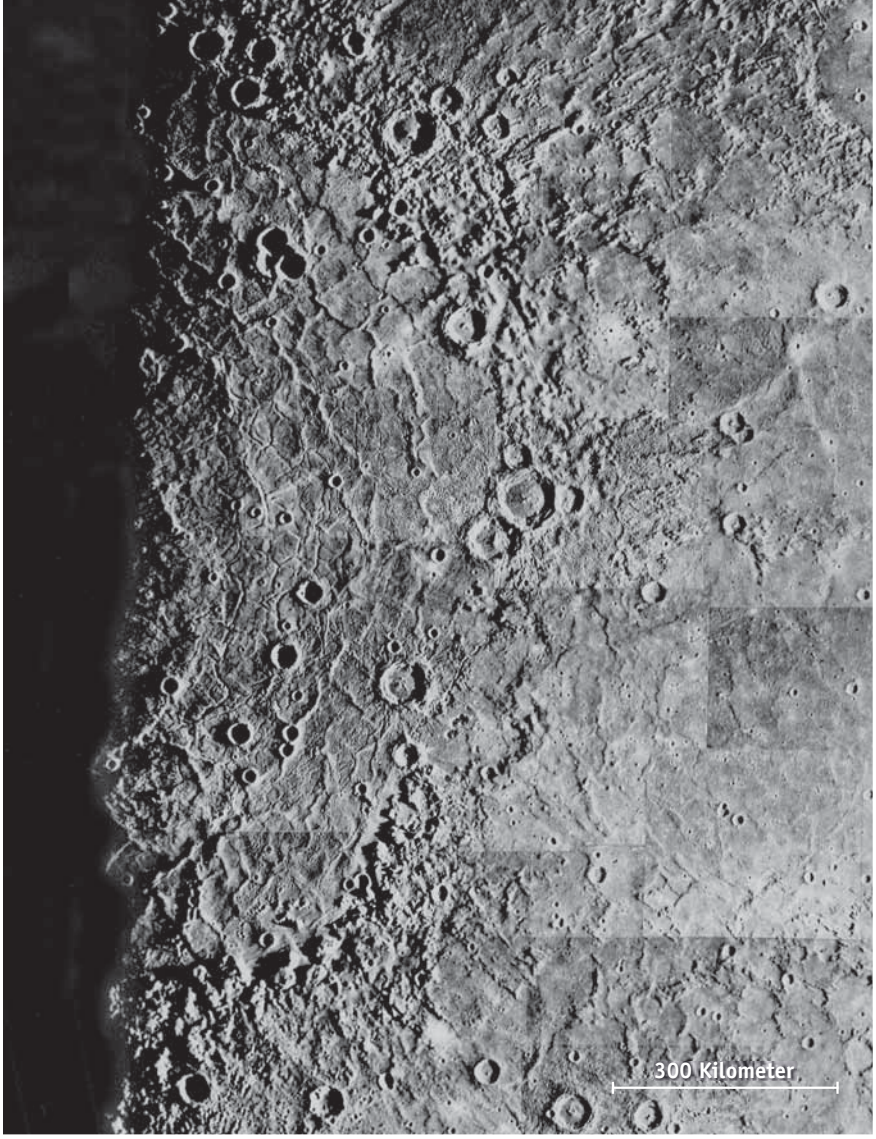
Parameter	Einheit *n*	Merkur	Erde	Verhältnis Merkur/Erde
Große Halbachse	10^6 km	57.9	149.6	0.387
Perihel	10^6 km	46.0	147.1	0.313
Aphel	10^6 km	69.8	152.1	0.459
Exzentrizität	Prozent	20.56	1.67	12.311
Neigung gegen die Ekliptik	Grad	7.00	0.00	-
Mittlere Bahngeschw.	km/s	47.89	29.79	1.608
Dauer des Jahres	Tage	87.969	365.256	0.241
Rotationsdauer	Stunden	1407.6	23.9345	58.785
Achsenneigung	Grad	0.01?	23.44	0.004

Das Einschlagbecken Caloris

Das auffälligste Oberflächenmerkmal der bekannten Merkuroberfläche ist das Caloris-Becken, ein riesiger Einschlagkrater mit einem Durchmesser von 1340 Kilometern, was fast einem Drittel des Planetendurchmessers entspricht. Caloris liegt auf dem 180-Grad-Meridian und wurde von MARINER-10 nur zur Hälfte erfasst und kartiert (Abb. 5).

Seine Struktur erinnert an das Mare Orientale auf dem Mond. Wie jenes besteht es aus mehreren konzentrischen Ringwällen. Zwischen den Ringen finden sich Lavaebenen, die deutlich weniger Einschlagkrater aufweisen als andere Merkurregionen. Nach bisherigem Stand der Forschung entstand Caloris vor etwa 3.85 Milliarden Jahren, als ein rund 150 Kilometer großer Asteroid auf der Merkuroberfläche aufschlug. Die dabei freigesetzte Energie entsprach schätzungsweise derjenigen von einer Billion (10^{12}) Wasserstoffbomben mit je einer Megatonne Sprengkraft. Dieser Einschlag war so heftig, dass er sich auf den gesamten Planeten auswirkte. Exakt gegenüber von Caloris auf der anderen Planetenseite findet sich eine Region, in der die Oberfläche stark aufgeworfen und zerrüttet ist. Was ist hier geschehen?

Beim Einschlag des Caloris-Impaktors durchliefen offenbar starke Stoßwellen den gesamten Körper des Planeten. Dabei



NASA

Abb. 4: Die Verwerfung Discovery Rupes (Pfeile) erstreckt sich über mehr als 500 Kilometer und weist Höhenunterschiede bis 2000 Meter auf. Sehr schön lassen sich zwei von der Verwerfung durchschlagene Einschlagkrater erkennen, die Verwerfung entstand offenbar erst nach ihnen.

Abb. 5: Das Einschlagbecken Caloris – hier dicht an der Tag-Nacht-Grenze gelegen – ist mehr als 1300 Kilometer breit. In seinem Inneren befinden sich Lavaebenen, die eine eigentümlich runzelige Textur aufweisen. Sie sind bislang nur von Merkur bekannt.

wirkte das Planeteninnere wie eine akustische Linse und bündelte die durchlaufenden Stoßwellen auf die Antipodenregion ähnlich wie eine Glaskugel das Licht. An den Antipoden drangen die seismischen Wellen wieder an die Oberfläche und zerrütteten sie.

Eis an den Polen ?

Nach der Auswertung der Aufnahmen von MARINER-10 blieb es in der Merkurforschung lange Zeit ruhig. Mit dem Radioteleskop von Arecibo gelangen Anfang der 1990er Jahre Beobachtungen der nicht von MARINER-10 erkundeten Merkurhemisphäre. Diese ähnelt bis zur Auflösungsgrenze der Radarbilder weitgehend dem bereits erforschten Gebiet. Um so größer war die Überraschung, als sich an den Merkurpolen Hinweise auf Eisablagerungen ergaben. Auf den Radarbildern zeigten sich bei nahe den beiden Polen liegenden Einschlagkratern helle Flecken, deren Rückstrahlverhalten gut zu Wassereis passt. In diese polnahen Einschlagkrater fällt nie ein Sonnenstrahl, da Merkurs Achsenneigung annähernd null Grad beträgt. In ihnen herrschen also Temperaturen von nur wenigen Grad über dem absoluten Nullpunkt (–273 Grad Celsius), sodass die Idee der Ablagerung von Wassereis nicht völlig abwegig erscheint.

Allerdings dürfte Merkur wegen seiner großen Sonnennähe von Anfang an nur sehr wenige flüchtige Stoffe wie Wasser enthalten haben, sodass die Abscheidung aus der ursprünglichen Merkurmaterie nur schwer erklärbar ist. Ein alternativer Lösungsvorschlag vermutet mit Merkur kollidierte Kometen als Wasserbringer, was plausibel ist, da Kometenkerne einen hohen Anteil an Wassereis enthalten. Beim Zusammenprall mit der Merkuroberfläche verdampft ein solcher Impaktor vollständig. Für kurze Zeit nach dem Einschlag verfügt Merkur dann vorübergehend über eine Atmosphäre aus Wasserdampf und anderen Gasen, deren Bestandteile in den »Kratern der ewigen Dunkelheit« an den Polen ausfrieren könnten.

Aber auch andere Szenarien sind zur Erklärung der hellen Flecken denkbar, die »exotische« Vorgänge als Erklärung in Betracht ziehen. Beispielsweise könnten sich die in der Atmosphäre nachgewiesenen Alkalimetalle direkt in den Kratern niederschlagen und dort über mehrere Milliarden Jahre hinweg ansammeln.

Wege zu Merkur

Der innerste Planet ist aus energetischen Gründen schwer zu erreichen. Um dorthin zu gelangen, muss eine Raumsonde etwa sechzig Prozent der von der Erde beim Start mitgelieferten Bahnenergie loswerden, um so nahe an die Sonne heranzukommen. Im Gegensatz zu Flügen zu den äußeren Planeten, bei denen man dankbar für die mitgelieferte Bahngeschwindigkeit der Erde ist, stellt sie für Merkurmissionen ein Hindernis dar. Daher müssen Bremsmanöver durchgeführt werden, um die Bewegungsenergie abzubauen. Normale Raketenmotoren haben jedoch den Nachteil, dass sie für derartige Manöver große Mengen an Treibstoff benötigen. Deshalb entschied man sich bei BEPICOLOMBO schon früh für den Einsatz von Ionentriebwerken. Diese erzeugen nur einen sehr kleinen Schub. Im Falle der Triebwerke von BEPICOLOMBO beträgt er maximal 260 Millinewton, winzig im Vergleich zum 450 Newton starken Raketenmotor des chemischen Antriebs der Sonde. Ionentriebwerke stoßen ihren Treibstoff jedoch mit rund zehnmal höherer Geschwindigkeit als normale Raketentriebwerke aus, und im Gegensatz zu letzteren mit ihren Brenndauern von nur einigen Minuten können sie über Monate oder gar Jahre ununterbrochen in Betrieb sein. Als Treibstoff dient das Edelgas Xenon. Wegen der hohen Ausstoßgeschwindigkeit ist ihr Treibstoffverbrauch äußerst gering, sodass für sie nur wenig Treibstoff getankt werden muss und beträchtlich Gewicht gespart werden kann.

Jedoch erhöht sich bei ihrer Verwendung die Reisezeit zu Merkur beträchtlich. Auch ist ihr Bedarf an elektrischer

Die Instrumente des Mercury Planetary Orbiter (MPO)

Der Mercury Planetary Orbiter ist mit elf wissenschaftlichen Instrumenten ausgerüstet, die insgesamt 52 Kilogramm wiegen. Am interessantesten dürfte das Kamerasystem Simbio-Sys sein. Das Akronym bedeutet »Spectrometers and Imagers for MPO BepiColombo Integrated Observatory System« und besteht eigentlich aus drei Instrumenten.

- Ein Stereo-Kanal (STC) soll die gesamte Oberfläche des Merkur mit einer Auflösung von 30 Metern pro Bildpunkt dreidimensional in Farbe kartieren. Eine hochauflösende Kamera, der High spatial Resolution Imaging Channel (HRIC), wird ausgewählte Regionen des innersten Planeten mit bis zu zehn Metern pro Bildpunkt unter die Lupe nehmen.
- Vihi (Visible Infrared Hyperspectral Imager) liefert Informationen über die mineralogisch-chemische Zusammensetzung der Merkuroberfläche. Vihi erreicht zwar nur eine räumliche Auflösung von 500 Metern pro Bildpunkt, nimmt dafür aber die Oberfläche mit 256 Spektralkanälen im Bereich von 400 Nanometern (blaues sichtbares Licht) bis 1600 Nanometern (nahes Infrarot) ins Visier. Aus diesen Daten lassen sich dann detaillierte Karten der mineralogischen Zusammensetzung der Merkuroberfläche erstellen.
- Mertis, das »Mercury Radiometer and Thermal Infrared Spectrometer« verfolgt ein ähnliches Ziel. Es beobachtet Merkur im Infraroten in einem Wellenlängenbereich zwischen 7000 und 14 000 Nanometern mit einer spektralen Auflösung von 90 Nanometern. Mertis liefert sowohl Informationen über die mineralische Zusammensetzung der Merkuroberfläche, als auch Daten über die Oberflächentextur und Temperaturen.
- MIXS, das »Mercury Imaging X-Ray Spectrometer«, nutzt die Röntgenstrahlung der Sonne, um die Konzentrationen wichtiger gesteinsbildender Elemente wie Magnesium, Aluminium, Silizium, Kalzium, Titan und Eisen und deren Verteilungen auf der Merkuroberfläche zu bestimmen. Um die Daten von MIXS auswerten zu können, muss der Strahlungsfluss der Sonne genau bekannt sein. Diesem Zweck dient SIXS, das »Solar Intensity X-Ray and Particle Spectrometer«. Es misst die Stärke der von der Sonne ausgehenden Röntgenstrahlung und nimmt Energiespektren solarer Protonen und Elektronen auf, die auf der Merkuroberfläche sekundäre Röntgenfluoreszenzstrahlung erzeugen.
- Das »Mercury Gamma-Ray and Neutron Spectrometer (MGNS)« soll ebenfalls die Zusammensetzung der Merkuroberfläche erkunden und die Ablagerungen in den Kratern der ewigen Dunkelheit an den Merkurpolen identifizieren. MGNS nutzt dabei die kosmische Strahlung, die etwa ein bis zwei Meter in die Merkuroberfläche eindringt. Dabei wird sekundäre Gamma- und Röntgenstrahlung erzeugt, die MGNS auffängt. Auch der radioaktive Zerfall der Elemente Uran (^{238}U, ^{235}U), Thorium (^{232}Th) und Kalium (^{40}K) liefert unabhängig von der Kosmischen Strahlung Röntgenstrahlung und erlaubt die Kartierung der Verteilung dieser Elemente auf der Merkuroberfläche.
- Bela, das »BepiColombo Laser Altimeter«, wird die Oberfläche mittels Laserstrahlen abtasten, um mehr über die physische Gestalt Merkurs herauszufinden und eine globale Topographie der Oberfläche zu erstellen. Das Gerät sendet kurze Laserpulse aus und misst deren Rücklaufzeit. Aus dieser lässt sich bei bekannter Umlaufbahn der Abstand von BepiColombo zur Merkuroberfläche bestimmen und daraus die Topographie ableiten. Es ist geplant, die gesamte Merkuroberfläche mit einer vertikalen Genauigkeit von zwanzig Metern zu erkunden.
- More, das »Mercury Orbiter Radio-Science Experiment«, soll Informationen über

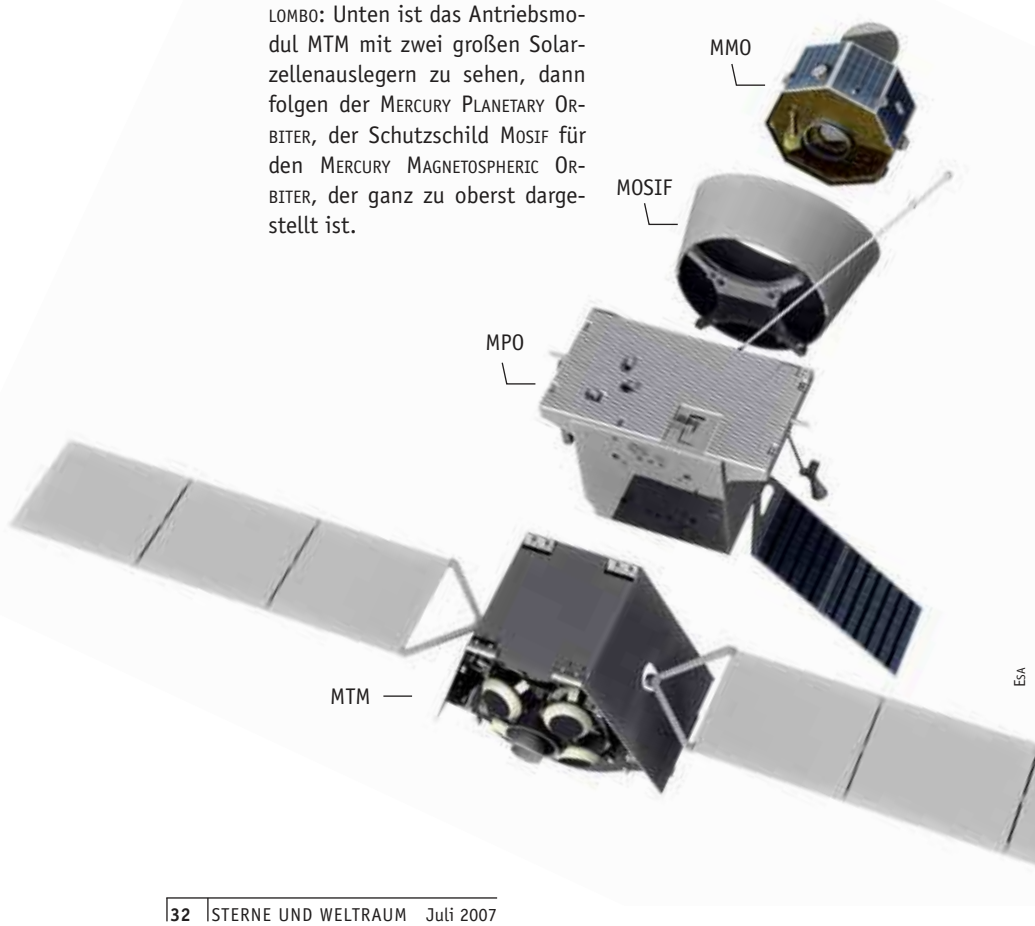


Abb. 6: Die vier wichtigsten Komponenten der Raumsonde BepiColombo: Unten ist das Antriebsmodul MTM mit zwei großen Solarzellenauslegern zu sehen, dann folgen der Mercury Planetary Orbiter, der Schutzschild Mosif für den Mercury Magnetospheric Orbiter, der ganz zu oberst dargestellt ist.

Energie hoch, denn für die Schubmanöver werden rund sechs Kilowatt elektrische Leistung benötigt. Die Elektrizität wird von Solarzellenauslegern geliefert. Schon im Jahre 2004 erprobte die europäische Sonde Smart-1 das Konzept und schwenkte nach einem 14-monatigen Flug in eine Umlaufbahn um den Mond ein (siehe SuW 6/2005, S. 32ff.).

Die Raumsonde BepiColombo

Das Projekt ist eine Zwillingsmission und verwendet eigentlich zwei Raumsonden, welche zwar gemeinsam gestartet werden und auch zusammen bei Merkur ankommen, die dann aber jeweils ihre eigenen Wege gehen. Die beiden Sonden heißen Mercury Planetary Orbiter (MPO) und Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO), siehe Abb. 6. Sie werden im Detail weiter unten besprochen.

Gestartet werden die beiden Sonden im August 2013 mit einer russischen Trägerrakete vom Typ Sojus-2 mit Fregat-Oberstufe von der Startrampe in Kourou, Französisch-Guayana. Insgesamt werden

ESA

Der Mercury Planetary Orbiter (MPO) ist der Hauptbeitrag der Esa zum Projekt BepiColombo, er dient zur Erkundung der festen Oberfläche und des Planetenkörpers von Merkur. Er ist mit elf Instrumenten ausgerüstet.

das Innere des Merkur liefern. Es untersucht das Schwerefeld des Planeten und leitet aus dem Bahnverlauf um Merkur Informationen über die Größe und den physikalischen Zustand des Planetenkerns ab. Vor allem soll die Frage geklärt werden, ob Merkur noch über einen teilweise flüssigen Eisenkern verfügt. Bei den Messungen wird More von Isa, dem »Italian Spring Accelerometer« unterstützt. Dieses hochempfindliche Instrument misst Beschleunigungen, die auf BepiColombo einwirken. Nach Abzug der bekannten Bahnparameter lassen sich aus den beobachteten Beschleunigungen Rückschlüsse auf die Massenverteilung im Inneren Merkurs ziehen. Dabei sollen lokale Schwereanomalien, das Rotationsverhalten des Planeten und die Bewegung des Massenzentrums von Merkur um die Sonne erforscht werden.

■ Mermag, das »Mercury Magnetometer«, dient der Erforschung des schwachen Dipolmagnetfelds des innersten Planeten. Das Gerät besteht aus zwei Sensorköpfen, die auf einem 3.2 Meter langen Ausleger montiert sind, um nicht durch die Magnetfelder der Bordelektronik von BepiColombo gestört zu werden. Diese Messungen finden koordiniert mit dem japanischen Magnetosphären-Orbiter statt und liefern Daten aus geringerem Abstand zur Planetenoberfläche. Mit diesen Messungen soll endgültig geklärt werden, ob das Magnetfeld Merkurs wirklich aus dem Inneren des Planeten stammt.

■ Serena, die »Search for Exospheric Refilling and Emitted Natural Abundances« soll das planetare Umfeld erkunden. Dabei erhofft man sich Informationen über die Zusammensetzung und Struktur der äußerst dünnen Atmosphäre und Ionosphäre Merkurs sowie über ihre Wechselwirkungen mit dem Magnetfeld und dem Sonnenwind. Auch die eher unwahrscheinliche Freisetzung vulkanischer Gase wird erforscht.

■ Phebus, »Probing of Hermean Exosphere by Ultraviolet Spectroscopy« untersucht die äußerst dünne Gashülle des sonnennächsten Planeten. Es soll vor allem die Wechselwirkungen der Gase mit der festen Oberfläche und dem Magnetfeld Merkurs erforschen.

3065 Kilogramm auf den sechs Jahre dauernden Flug zum Merkur gebracht (Abb. 6). Im März 2007 ernannte die Esa den europäischen Luft- und Raumfahrtkonzern EADS-Astrium in Friedrichshafen am Bodensee zum Hauptauftragnehmer, der BepiColombo im Detail entwickeln und bauen soll.

Das Antriebsmodul MTM

Das »Mercury Transfer Module (MTM)« von BepiColombo verwendet vier Ionentriebwerke, von denen in den Schubphasen zwei im Betrieb sind, die beiden anderen dienen der Reserve. Das MTM besitzt die Gestalt eines abgestumpften Keils (Abb. 6). Er ist 2.9 Meter lang, maximal 2.7 Meter breit und zwei Meter hoch. An seiner Unterseite befinden sich die vier Ionentriebwerke und die Schubdüse des 450-Newton-Haupttriebwerks. An seinen Seiten sind zwei Solarzellenausleger mit je 11.5 Quadratmeter Fläche angebracht, die in einem Abstand von einer Astronomischen Einheit (149.6 Millionen Kilometer) zur Sonne sechs Kilowatt elektrischer Leistung liefern.

Ionentriebwerke können keine Schubmanöver durchführen, in denen in kurzer Zeit große Geschwindigkeitsänderungen erzielt werden sollen. Darum muss auch ein konventioneller chemischer Antrieb an Bord sein. Dieser verwendet ein 450-Newton-Haupttriebwerk für die großen Bahnmanöver und acht kleine 20-Newton-Raketendüsen für kleine Steuermanöver. Als Treibstoffe dienen Hydrazin und Distickstofftetroxid. MTM wiegt mit Treibstoffen 1830 Kilogramm.

Mercury Planetary Orbiter (MPO)

Der Hauptbeitrag der Esa zu BepiColombo ist der Mercury Planetary Orbiter. Er dient der Erkundung der festen Merkuroberfläche und des Planeteninneren (siehe Kasten oben). MPO ist annähernd quaderförmig, etwa drei Meter lang, zwei Meter breit und 1.5 Meter hoch. Die Struktur von MPO besteht aus kohlefaserverstärkten Kunststoffen. Das Gesamtgewicht mit Treibstoffen beträgt 945 Kilogramm. An einer Seite der Sonde befindet sich auf einer Schwenkmontierung die 1.2 Meter große Parabolhauptantenne für die Datenübermittlung zur Erde. Sie lässt sich in zwei Achsen steuern und so permanent in Richtung Erde ausrichten.

Die wissenschaftlichen Instrumente sind auf der Nadirseite der Sonde angebracht, dem Teil von MPO, der ständig auf den Fußpunkt der Umlaufbahn auf der Merkuroberfläche ausgerichtet ist. So haben die Instrumente Merkur stets im Blick. MPO ist eine drei-Achsen-stabilisierte Sonde, sie ist im Raum stets exakt ausgerichtet. Die zur Sonne weisende Seite ist mit Schutzschilden gegen die enorme Sonneneinstrahlung von bis zu 14 Kilowatt pro Quadratmeter ausgerüstet. Heatpipe-Systeme transportieren die Wärme von Sonne und den Bordinstrumenten zu einer Abstrahlfläche (Radiator) auf der Schattenseite der Sonde.

Aufgrund der großen Nähe zur Sonne fällt das Sonnenlicht im Überfluss ein, so dass eine Solarzellenfläche von insgesamt drei Quadratmetern zur Energieversorgung ausreicht. Verwendet werden Gallium-Arsenid-Germanium-Solarzellen. Damit die Sonde auch im Merkurschatten weiter arbeiten kann, sind zwei Pufferbatterien vorgesehen.

Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO)

Das Design der zweiten Raumsonde wurde ganz auf die Partikel- und Felduntersuchungen abgestimmt. Im Gegensatz zu herkömmlichen Fernerkundungsinstrumenten, die exakt auf ihr Ziel gerich-

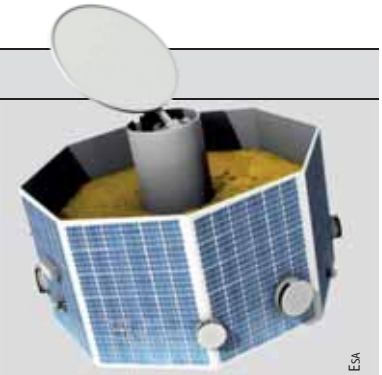
Die Instrumente des Magnetosphären-Orbiters MMO

Die japanische Raumsonde MMO ist mit fünf Instrumenten ausgerüstet, die das Magnetfeld und die dünne Atmosphäre Merkurs im Detail erkunden. An zwei fünf Meter langen Auslegern ist je ein Drei-Achsen-Magnetometer mit der Bezeichnung MGF montiert, welches die räumliche Struktur des Magnetfelds untersucht. MPPE, das »Mercury Plasma Particle Experiment«, besteht aus mehreren Spektrometern, welche die Mengen und Arten von Elektronen, Ionen und neutralen Atomen charakterisieren. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf Atomen, die durch den Sonnenwind aus der Merkuroberfläche herausgeschlagen werden.

PWI, die »Plasma Wave Investigation«, beobachtet mit Hilfe von vier 15 Meter langen Drahtantennen langwellige Radiostrahlung, die in der nur sehr schwach ausgeprägten Ionosphäre von Merkur entsteht.

MSASI, der »Mercury Sodium Atmosphere Spectral Imager« kartiert die Konzentrationen und die Verteilung von Natrium im Umfeld des Planeten.

Zu guter Letzt untersucht MDM, der »Mercury Dust Monitor«, die Verteilung und Größen des interplanetaren Staubs in der Nähe des innersten Planeten und seine Wechselwirkung mit der Merkuroberfläche.



Der Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO) wird von der japanischen Weltraumbehörde Jaxa beigesteuert und soll die dünne Atmosphäre und das Magnetfeld des Planeten erkunden.

tet werden müssen, sollen die Instrumente von MMO einen möglichst großen Raumbereich abdecken. Daher entwarf die japanische Weltraumbehörde Jaxa eine spinstabilisierte Raumsonde.

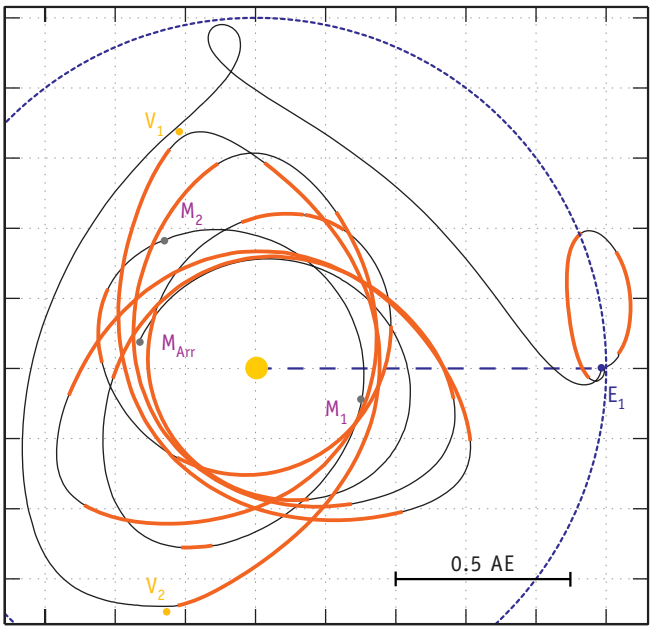
Sie besitzt die Form eines achtseitigen Prismas mit etwa 1.8 Meter Durchmesser und einer Höhe von etwa 0.9 Metern (siehe Abb. im Kasten oben). Zur Stabilisierung rotiert MMO mit 15 Umdrehungen pro Minute, wobei die Rotationsachse stets senkrecht zum Merkuräquator steht. Die Kontrolle der Ausrichtung und der Rotationsgeschwindigkeit erfolgt mit einem Kaltgasdüsensystem. Auch bei MMO musste die enorme thermische Belastung beim Design berücksichtigt werden. Die Außenseiten des Prismas sind überwiegend mit Spiegeln belegt, um die Sonnenstrahlung zu reflektieren.

An der Oberseite des Prismas wird auf einem Mast die achtzig Zentimeter große Hauptantenne zur Datenübermittlung zur Erde angebracht. Die meisten Instrumente, beziehungsweise ihre Sensorköpfe, sind auf den Außenseiten des Prismas montiert. Zusätzlich besitzt MMO zwei fünf Meter lange Ausleger für die Magnetometer und vier 15 Meter lange Drahtantennen für Plasmawellenuntersuchungen. Die Energie bezieht MMO aus Solarzellen, die rund 200 Watt elektrische Leistung liefern. Eine Pufferbatterie erlaubt den Betrieb der Raumsonde auch im Merkurschatten. MMO wiegt mit Treibstoff insgesamt 250 Kilogramm.

Während des etwa sechsjährigen Flugs zum Merkur ist MMO auf der Oberseite des Mercury Planetary Orbiter (MPO) montiert und wird dort durch einen trichterförmigen Schild namens Mosif (MMO Sunshield and Interface) vor der stark wechselnden Sonneneinstrahlung geschützt. Dieser ist maximal 2.5 Meter breit und 1.7 Meter lang. Mosif wiegt etwa vierzig Kilogramm und stellt die feste mechanische Verbindung zu MPO her.

Missionsablauf

Wie schon oben erwähnt, ist Merkur aus energetischen Gründen eine schwierig zu erreichende Welt. Ein direkter Flug auf einer Transferbahn wie beispielsweise bei Sonden zum Mars erfordert entweder eine leichte kleine Raumsonde oder eine leistungsstarke und teure Trägerrakete.



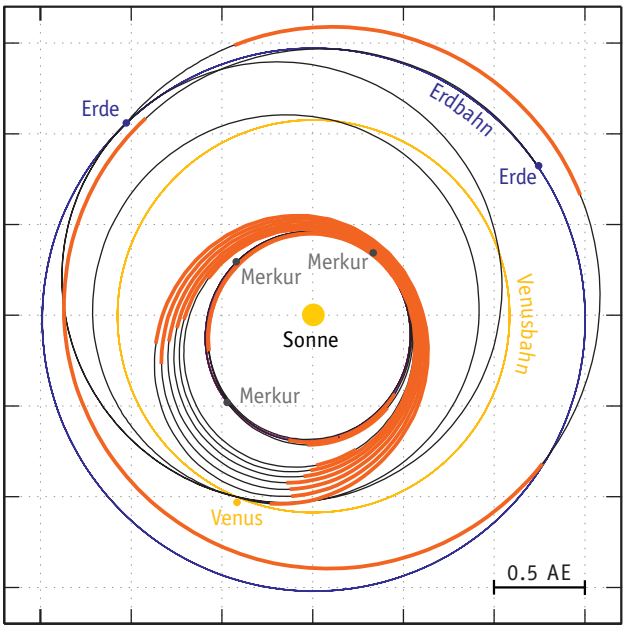


Abb. 7: Die komplizierte Flugbahn von BepiColombo. Links ist die Bahn bei feststehendem Referenzsystem Sonne-Erde dargestellt, rechts konventionell mit feststehender Sonne. Rote Bahnabschnitte geben Schubmanöver mit dem Ionenantrieb an. E_1 = Erdvorbeiflug; V_1 und V_2 = Venusvorbeiflüge; M_1 und M_2 = Merkurvorbeiflüge; M_{Arr} = Ankunft bei Merkur

ESA/SuW

Ein Ausweg, die Startkosten zu reduzieren, ist die Nutzung von Swingby-Manövern: Hierzu tritt die Raumsonde in das Schwerefeld eines Planeten oder Mondes ein und wird von dessen Schwerkraft relativ zur Sonne beschleunigt oder gebremst. Dabei verliert oder gewinnt der Planet zugunsten der Raumsonde Bahnbewegungsenergie. Da ein Planet im Vergleich zu einer Raumsonde eine riesige Masse besitzt, sind die Auswirkungen auf ihn selbst unmessbar klein.

Übrigens war MARINER-10 die erste Raumsonde überhaupt, die 1974 einen Vorbeiflug an der Venus zum Erreichen des nächsten Flugziels Merkur verwendete.

Bei BEPICOLOMBO wird eine Kombination aus Planetenvorbeiflügen und langen Schubmanövern mit den Ionentriebwerken eingesetzt, um das Ziel zu erreichen. Die SOJUS-Rakete setzt im August 2013 die aus drei fest aneinandergekoppelten Hauptmodulen bestehende Sonde in einer hochexzentrischen Erdumlaufbahn ab, deren erdfernster Punkt, das Apogäum, in etwa 36 000 Kilometer Abstand liegt.

Mit Hilfe von Schubmanövern des 450-Newton-Haupttriebwerks des Mercury Transfer Module wird das Apogäum bei den Umläufen um die Erde weiter erhöht, bis es in etwa 420 000 Kilometer Abstand die Umlaufbahn des Mondes erreicht. Am 31. Oktober 2013 passiert dann die Kombination aus Antriebsmodul und den beiden Sonden den Erdtrabanten in einer Höhe von etwa 200 Kilometern und wird durch dessen Schwerkraft auf eine Erdfluchtbahn gelenkt (Abb. 7)

Danach fliegt BEPICOLOMBO für anderthalb Jahre auf einer mit der Erdbahn fast identischen Sonnenumlaufbahn und führt zwei Schubmanöver mit dem Ionenantrieb durch. Am 1. Februar 2015 fliegt die Sonde am Blauen Planeten vorbei und wird durch dessen Schwerkraft auf den Kurs zur Venus gebracht. Diese wird im Februar 2016 im Vorbeiflug passiert.

Der Termin ist so gewählt, dass es nach einem Venusjahr (225 Erdtage) zu einem weiteren Vorbeiflug im September 2016 kommt, der dann die Sonde in Richtung Merkurbahn bringt.

Nach dem Verlassen der Venusbahn beginnt die wichtigste Arbeitsphase für die Ionenantriebe, die nun in mehreren Abschnitten lange Zeit aktiv sein werden (Abb. 8). Nach Abschluss der Schubmanöver ist die Merkurbahn erreicht. In Abb. 7 sind die Phasen der Schubmanöver rot markiert. Es folgen im Abstand von 88 Tagen noch zwei Vorbeiflüge am Merkur im August und Oktober 2018, dann beginnt nach sechs Jahren Flugzeit das Abbremsen in die Merkurumlaufbahn.

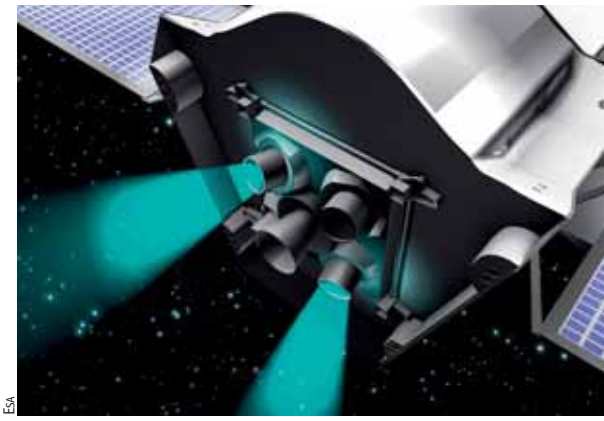

ESA

Abb. 8: Zwei Ionentriebwerke, hier mit grünlichen Plasmawolken dargestellt, bringen BEPICOLOMBO auf den Weg zum Merkur.

Die Ankunft

Während des finalen Anflugs auf Merkur im März 2019 hat das Antriebsmodul MTM seine Aufgabe erfüllt und wird abgeworfen. Der Sondenstapel benutzt nun die chemischen Antriebe des MERCURY PLANETARY ORBITER für die weiteren Bahnmanöver. MPO ist dafür mit vier Raketenmotoren mit je 22 Newton Schub ausgerüstet.

Normalerweise werden bei Erreichen des geringsten Abstands zum Ziel die Bremsraketen gezündet, was einen großen Teil des Treibstoffvorrats an Bord

GALILEO - Ihr Astrospezialist

TeleVue

TV-Serie

TV60 f/6	1342 CHF/839 €
TV76 f/6,3	2120 CHF/1325 €
TV85 f/7	2832 CHF/1770 €
TV102IIS f/8,6	4672 CHF/2920 €

NP/iS-Serie

TV60iS f/6	2634 CHF/1646 €
NP-101iS f/5,4	5769 CHF/3606 €
NP-127iS f/5,2	10167 CHF/6355 €

Okulare:

Nagler 2,5 - 13mm	je 447 CHF/279 €
Radian 3 - 18mm	je 364 CHF/228 €

Grosse Mittsommer-Aktion bei GALILEO in Zürich

In der Zeit vom 1. Juni 2007 bis zum 15. Juli 2007 findet bei GALILEO in Zürich eine grosse Mittsommer-Aktion statt.

In diesem Zeitraum erhalten Sie beim Kauf oder bei einer Bestellung ab 2000 CHF zusätzlich einen grünen Laserpointer (Wert 149 CHF) oder 9 StarWay-Farbfilter Ihrer Wahl (Wert 171 CHF) von uns kostenlos dazu. Lassen Sie sich diese Gelegenheit keinesfalls entgehen!

TeleVue-Aktionstag in Zürich

Am Samstag, 23. Juni 2007 stellen wir Ihnen in unserer Filiale in Zürich die grossartigen Produkte der amerikanischen Firma TeleVue vor.
Als Besonderheit erhalten Sie auf ALLE an diesem Tag in Zürich gekauften oder bestellten TeleVue-Artikel einen Rabatt von 10 % auf den normalen Verkaufspreis.

Wir freuen uns auf Ihren Besuch bei uns in der Zeit von 9.00 bis 16.00 Uhr.

Neu bei GALILEO

SWAROVSKI

Ferngläser:

EL 8,5x42	2765 CHF/1729 €
EL 10x42	2915 CHF/1822 €
SLC 15x56WB	2915 CHF/1822 €
SLC 10x50WB	2540 CHF/1588 €
Pocket 8x20B	930 CHF/582 €

Spektive:

ATS 65 HD	2620 CHF/1638 €
ATS 80	2445 CHF/1529 €
ATS 80 HD	3640 CHF/2275 €
Okularadapter	149 CHF/94 €

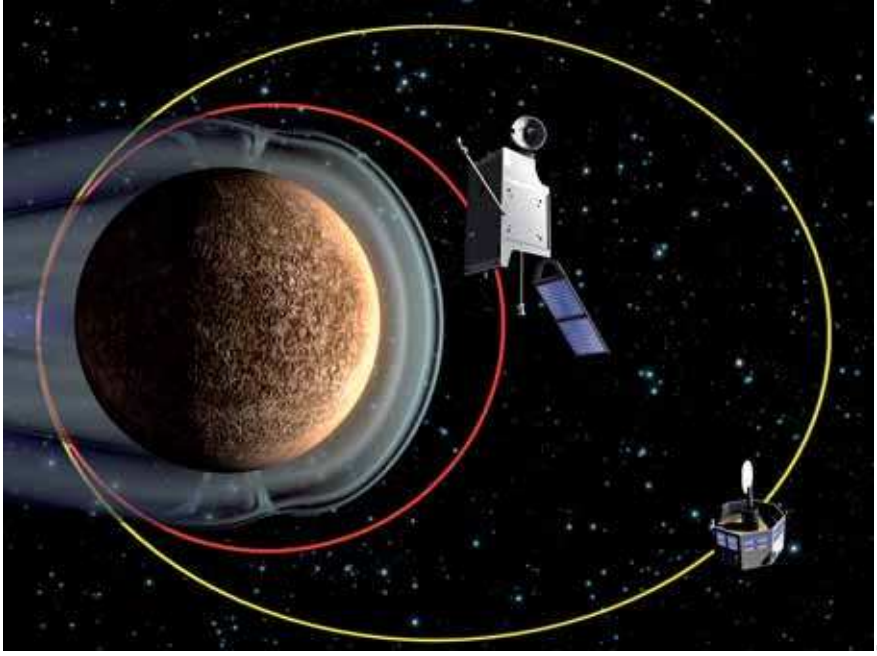
galileo

ADM · Argo Navis · ASA · Astrodon · Astronomik · AstroZap · Atik · Bob Knob's · Canon · Celestron · Cercis Astro · Coronado · Denkmeier · Diffraction Limited · Discovery · Equatorial Platforms · FLI · Gemini · Geoptik · Importations Chinoises · Intes Micro · Johnsonian Design · Losmandy · Lumicon · Lymax · Meade · Miyauchi · Obsession · OGS · Optec · RCOS · RoboFocus · SBIG · Sirius Observatories · SkyWatcher SolarScope · Software Bisque · Starlight Instruments · Starlight Xpress · StarryNight · StarWay · StellarCat · Swarovski · Takahashi · TEC · TeleVue · Vixen · William Optics

www.galileo.cc info@galileo.cc

Limmattalstrasse 206 - CH-8049 Zürich - Tel: +41 (0) 44 340 23 00 - Fax: +41 (0) 44 340 23 02
Rue de Genève 7 - CH-1003 Lausanne - Tel: +41 (0) 21 803 30 75 - Fax: +41 (0) 21 803 30 77

Preise inkl. 7.6% MWSt. Preise, Angaben und Abbildungen ohne Gewähr. Änderungen ohne Vorankündigung vorbehalten.



ESA

Abb. 9: So werden die beiden Teilsonden MERCURY PLANETARY ORBITER (rote Bahn) und MERCURY MAGNETOSPHERIC ORBITER (gelbe Bahn) den Merkur umrunden. Das eigentlich unsichtbare schwache Magnetfeld des Planeten ist hier schematisch dargestellt.

verschlingt. Falls ein solches Manöver misslingt, wäre das gesamte Projekt gescheitert: Die Sonde flöge am Planeten vorbei und verschwände nutzlos in den Tiefen des Sonnensystems.

BEPICOLOMBO bedient sich einer anderen Strategie: Hier nähert sich das Sondenkomposit dem Merkur mit sehr geringer Relativgeschwindigkeit. Der Anflug geschieht recht langsam über den Lagrange-Punkt 1, der innerhalb der Merkurbahn in Richtung zur Sonne liegt. Hier sind die Gravitationskräfte von Merkur und Sonne zusammengenommen genau gleich groß wie die Zentrifugalkraft, die auf einen Körper wirkt, der in dieser Entfernung in einem Merkurjahr um die Sonne läuft. Daher genügt ein relativ kleines Schubmanöver, um von einer Sonnenumlaufbahn in eine Merkurumlaufbahn zu gelangen. Dieser Vorgang wird als Schwerkrafteinfang (englisch: gravity capture) bezeichnet. Er bietet den Vorteil, dass er im Falle einer Fehlzündung der Triebwerke wiederholt werden kann.

Die anfängliche Bahn (merkurnächster Punkt 400 Kilometer, merkurfernster 180 000 Kilometer) des Sondenstapels ist nicht stabil; daher wird er durch Schubmanöver immer dichter an den Planeten herangeführt. Das erste Ziel ist eine polare Umlaufbahn mit Höhen zwischen 400 und 12 000 Kilometern mit einer Umlaufperiode von 9.2 Stunden. Ist sie erreicht, wird der japanische Magnetosphären-Orbiter MMO abgetrennt und die japanische Raumbehörde JAXA übernimmt ab diesem Zeitpunkt die Kontrolle über ihre Sonde. Kurze Zeit später wird der MOSIF-Schutzschild vom MERCURY PLANETARY ORBITER abgesprengt.

MPO muss jedoch noch dichter an den Planeten heran und soll ihn in Entfernungen zwischen 400 und 1500 Kilometer in 2.3 Stunden umrunden. Zum Absinken in diesen Orbit benutzt MPO seine Bordtriebwerke und erreicht im Juli 2019 die endgültige Umlaufbahn (Abb. 9).

Die wissenschaftliche Zielsetzung

Die Raumsonde BEPICOLOMBO soll den Planeten Merkur systematisch und detailliert erkunden und dabei wichtige Fragen klären:

- Was befindet sich auf dem bisher nicht erforschten Teil der Merkuroberfläche, also auf etwa 55 Prozent der Gesamtoberfläche?
- Wie ist die geologische Entwicklung des Planeten verlaufen, gibt es Hinweise auf langanhaltenden Vulkanismus? Gibt es außer der Kraterbildung durch Impakt noch aktive geologische Prozesse auf dem Merkur?
- Warum ist die mittlere Dichte des Merkur so extrem hoch? Verlor der Planet vielleicht in der Frühzeit der Planetenbildung vor über 4.5 Milliarden Jahren einen Großteil seines Gesteinsmantels durch einen gigantischen Zusammenstoß mit einem Planetesimal ähnlich jenem, der bei der Erde zur Bildung des Mondes führte?
- Wie ist Merkur im Inneren aufgebaut? Verfügt er noch ähnlich der Erde über einen in den äußeren Bereichen geschmolzenen Eisenkern?
- Was ist die Ursache des Magnetfelds und wie sehen seine Wechselwirkungen mit dem Sonnenwind aus?
- Woraus besteht die Merkuroberfläche, was ist ihre chemisch-mineralogische Zusammensetzung?

Die Zielsetzungen von BEPICOLOMBO gehen jedoch noch über die Erforschung des Merkur und seiner Umgebung hinaus. Da man sich nahe an der Sonne mit ihrem starken Schwerefeld befindet, lässt sich hier Einsteins Relativitätstheorie überprüfen. Lange Zeit stellte die zu rasche Periheldrehung der Merkurumlaufbahn ein schwieriges Rätsel dar, welches durch die klassische Physik nicht lösbar war. Die Periheldrehung ist das Wandern der großen Ellipsenachse der Merkurumlaufbahn um die Sonne. Sie wandert um 43 Bogensekunden pro Jahrhundert schneller als es nach klassischen Berechnungen zulässig ist.

Als Ursache wurde ein noch sonnennäherer Planet vermutet, der – auf den Namen »Vulkan« getauft – durch seine Schwerkraft Merkurs Umlaufbahn stören sollte. Als die intensive Erkundung der Sonnenumgebung zeigte, dass dieser Planet nicht existiert, stand man vor einem Problem, das sich nicht auf klassischem Wege lösen ließ.

Erst durch Anwendung der Relativitätstheorie, welche die Planetenbahnen mit der gleichzeitigen Krümmung von Raum und Zeit erklärt, wurde die Annahme eines Störplaneten unnötig. BEPICOLOMBO erlaubt nun sehr detaillierte Messungen der Merkurumlaufbahn und bestimmt die von der Relativitätstheorie vorausgesagten Effekte um einen Faktor 1000 genauer als bisher möglich.

BEPICOLOMBO ist Europas bisher komplexeste Mission zur Erkundung eines terrestrischen Planeten. Gelingt sie, wird sie unser Wissen über den innersten Planeten revolutionieren und weitere Mosaiksteine in das Gesamtbild über das innere Sonnensystem, seiner Entstehung und Entwicklung einfügen. □

Weitere Informationen

Robert G. Strom, Ann L. Sprague: Exploring Mercury – The Iron Planet. Springer-Verlag, Heidelberg, Berlin, New York 2003. ISBN: 978-1-85233-731-1

Weblinks zu diesem Artikel finden Sie auf unserer Homepage unter:
www.suw-online.de/artikel/874826

Tilmann Althaus ist seit 2002 Redakteur bei Sterne und Weltraum und betreut vor allem Themen zur Planetenforschung und Raumfahrt.

Vixen®

Vixen
Wir schenken Emotion!

Ihr kürzester Weg zur Astrofotografie sowie zur Beobachtung.

NEU!

SPHINX-D – der kräftigere Bruder der SX-Montierung 15kg reine Tragkraft

Die gesteigerte Stabilität in der Rektaszensions- und der Deklinationsachse wird durch den kompromisslosen Einsatz hochpräzise gedrehter Stahlachsen erzielt, anstelle von Achsen aus Aluminiumlegierungen (SX-Montierung).

Zusätzliche Lagerungen an der Rektaszensions- und Deklinationsachse sowie in den Schneckenfassungen führen zu einer merkbar komfortableren Antriebstechnik sowie noch besserer Handhabung.

Durch ein gelapptes Schneckenrad und modernste Fertigungstechnik der Schnecke wurden die Gleichlaufeigenschaften weiter verbessert.

Das SXD Star Book verfügt über eine Schnittstelle für SBIG-Kompatible Autoguider. Die Software erlaubt die Eingabe von Kometen-Bahnelementen. Zudem enthält sie die für die Astrofotografie wichtigen Funktionen, wie PEC und Backlash-Kompensation.

SXD
SPHINX-DELUXE

Technische Daten:	SXD	SXW
Maximale Zuladung:	370 kg pro cm	300 kg pro cm
Entspricht in 25cm-Abstand von der RE-Achse:	ca. 15 kg	ca. 12 kg
Achsenmaterial:	Stahl	Al-Legierung
Schneckenrad RE/DE:	je 180 Zähne Messing	je 180 Zähne Aluminium
Gesamtzahl der Kugellager:	9	1
Steuergerät:	Star Book	Star Book
Polsucher:	integriert	optional
Gegengewicht (inkl.):	3,7 kg+1,9 kg	1,9 kg
Gesamtgewicht (ohne Gegengewicht):	8,8 kg	6,8 kg
Artikelnummer:	2503	2502
UVP (inkl. 19% MwSt.):	€ 2.539,--	€ 1.692,--

Vixen Europe GmbH
http://www.vixen-europe.de/
Siemensring 44c, D-47877 Willich, Germany
Telefon 02154/8165-0
F a x 02154/8165-29

http://vixen-shop.eu/
Neu! Restposten